

# Bahnbestimmung im Zeitalter der Space Geodesy

Adrian Jäggi



# Bahnspur des sonj. Erdtrabanten

Sternbild: Ursa Major

Aufnahme: Schulsternwarte Rodewisch/WgH.  
13. Okt. 1957 4<sup>51</sup> h MEZ



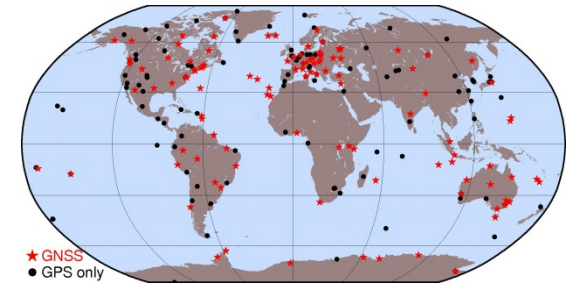


# Moderne Satellitenbeobachtungsverfahren



GNSS  
Global  
Navigation  
Satellite  
System

GPS  
GLONASS  
Galileo  
Compass



SLR  
Satellite  
Laser  
Ranging



Observatorium Zimmerwald bei Bern, Schweiz

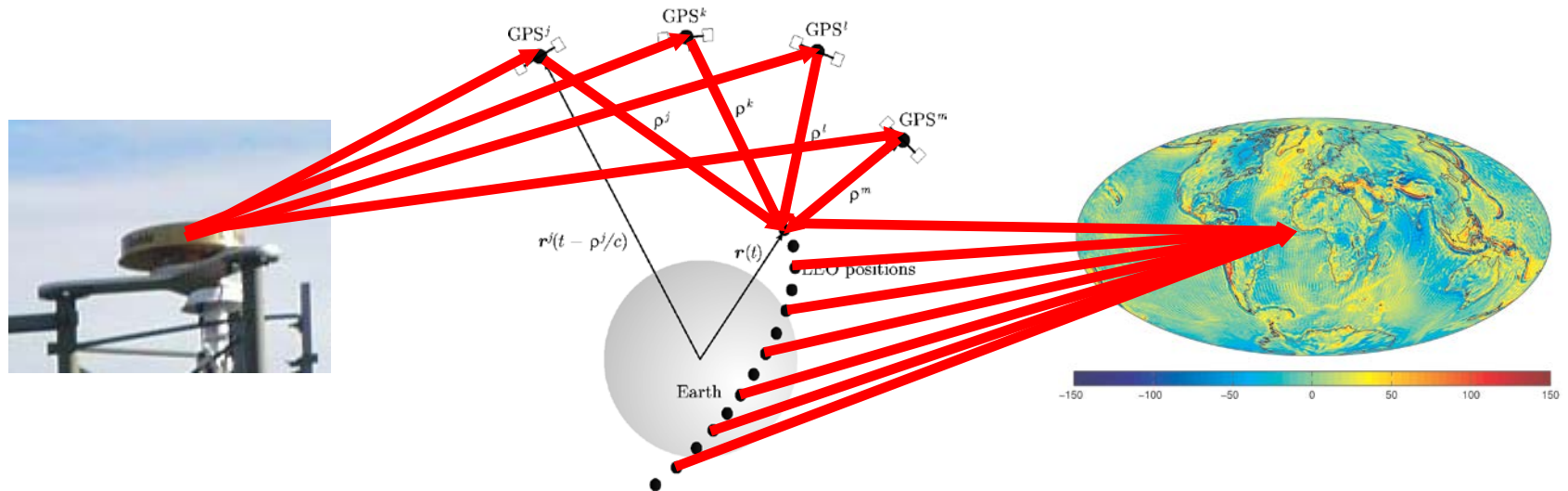
Moderne Satellitenbeobachtungsverfahren benötigen eine aufwändige und zum Teil teure **Infrastruktur**. Idealerweise sind mehrere geodätische Raumverfahren an einem Standort vereint (**Kolokation** der verschiedenen Techniken). Eine einzelne Station ist „nutzlos“, es braucht ein globales Netz von Stationen.

# Der lange Weg zum wissenschaftlichen Produkt

Originale  
Messungen

Zwischenprodukte,  
zusätzliche Messungen

Finales  
Produkt



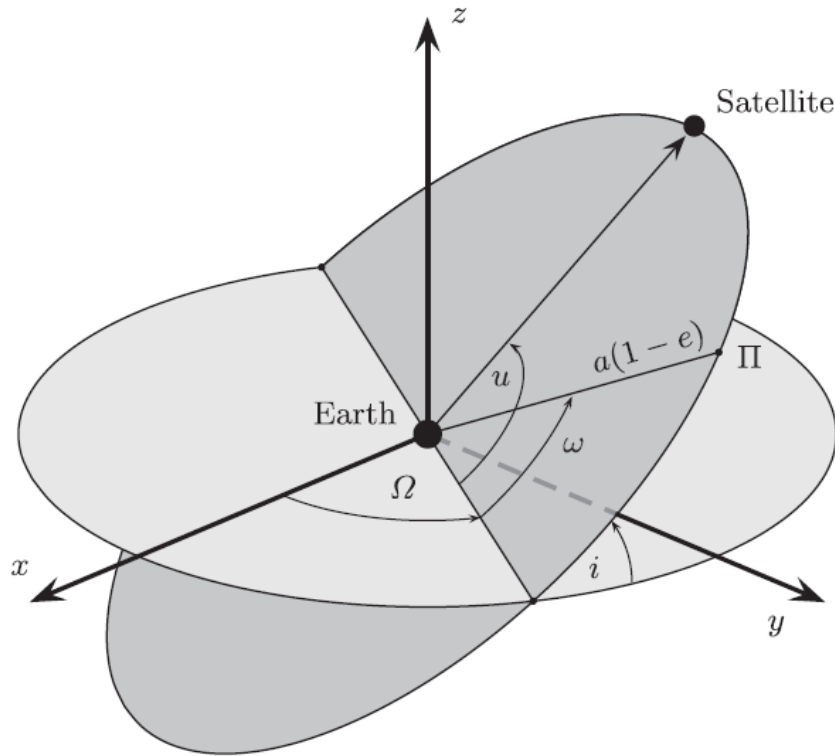
Gravitationsfeldmodelle der Erde sind bloss ein **Beispiel** für ein wissenschaftliches Produkt aus Messungen der geodätischen Satellitenverfahren. Im Rahmen des Vortrags soll es aber als immer wiederkehrendes Beispiel dienen.





# Grundlagen der Bahnbestimmung

Bahnparametrisierung: **Oskulierende Bahnelemente** zum Zeitpunkt  $t_0$

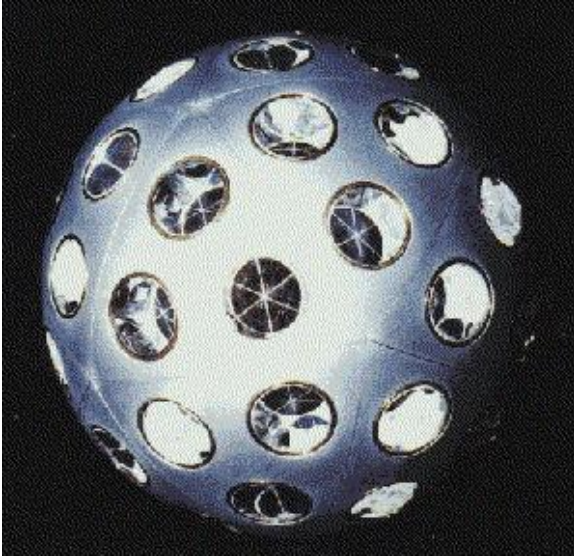


- $a$ : grosse Bahnhalbachse
- $e$ : numerische Exzentrizität
- $i$ : Bahnneigung
- $\Omega$ : Rektaszension des aufsteigenden Knotens
- $\omega$ : Perigäumsargument
- $u_0$ : Argument der Breite zum Zeitpunkt  $t_0$

Bahnparametrisierung: **Zusätzliche, unbekannte Parameter des Kräftefelds**

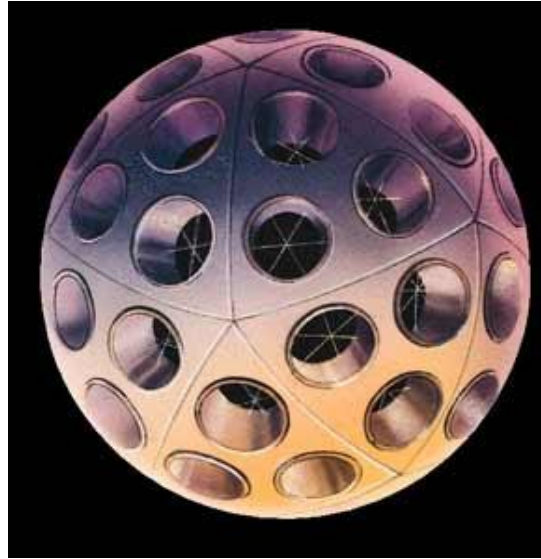
# Starlette, Stella, Ajisai

---



**Starlette**

Höhe: 850 km  
Inklination: 50°



**Stella**

Höhe: 850 km  
Inklination: 99°



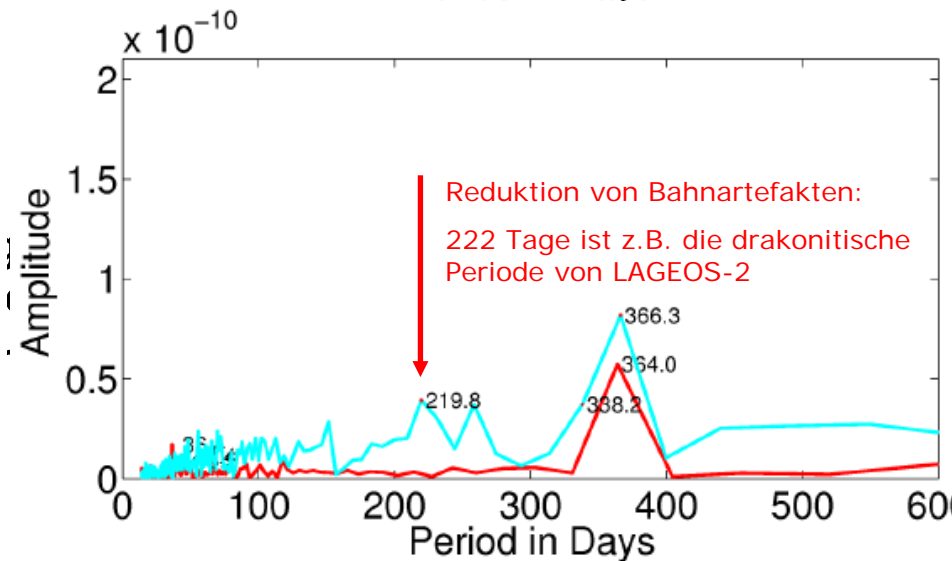
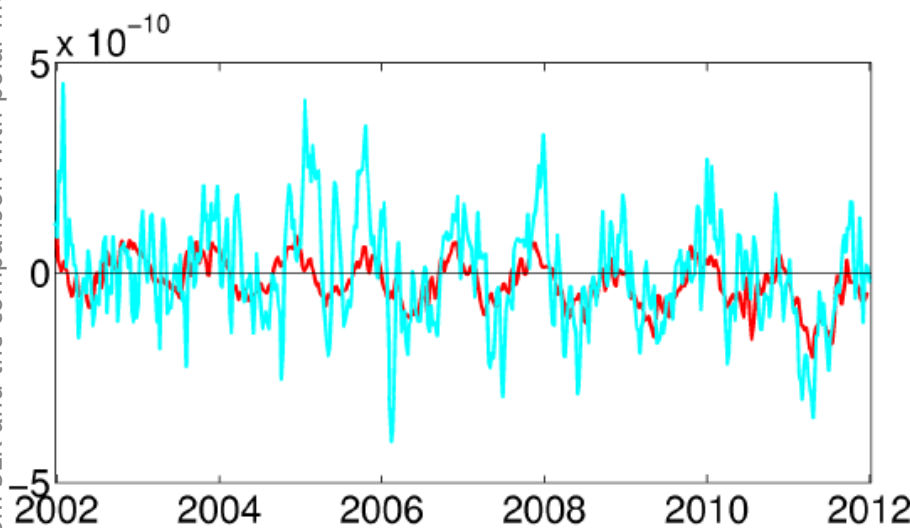
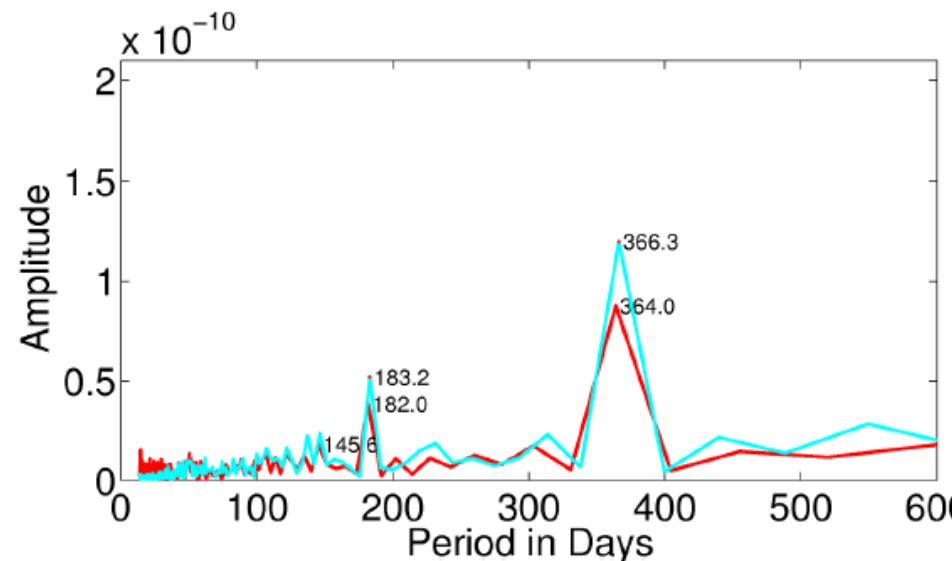
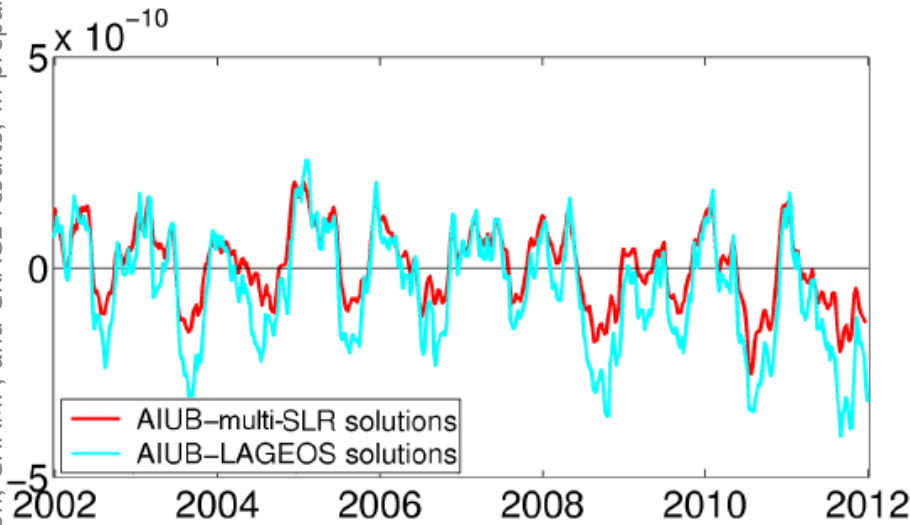
**Ajisai**

Höhe: 1485km  
Inklination: 50°



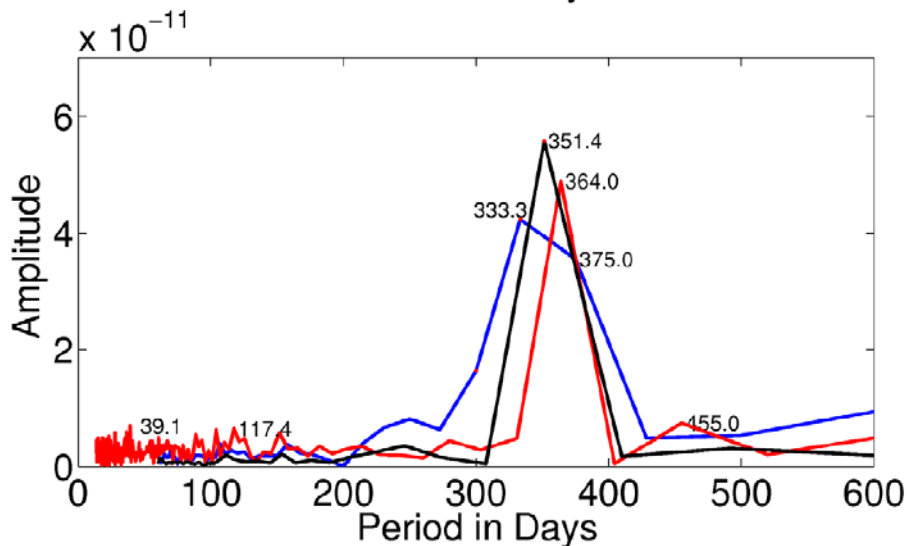
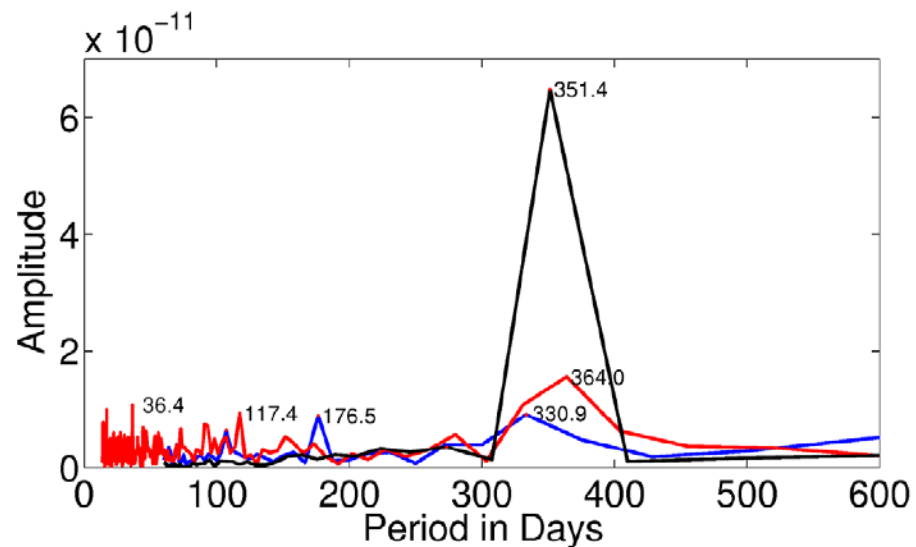
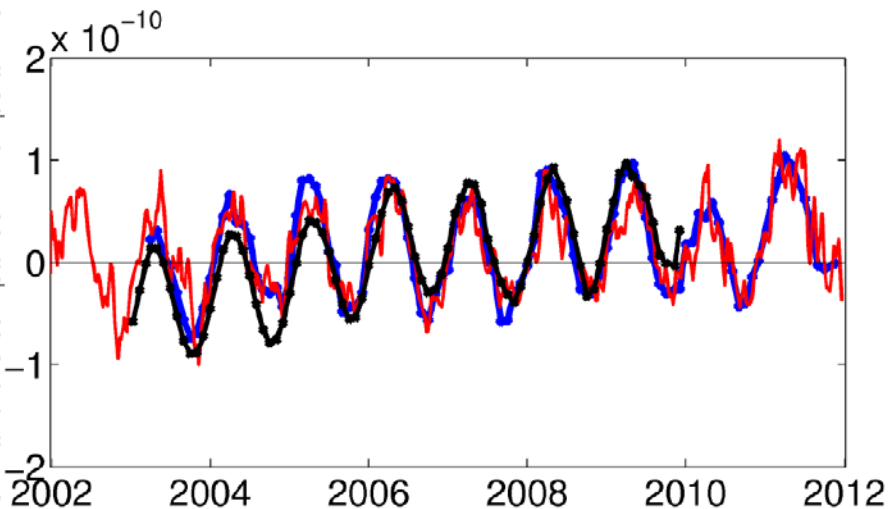
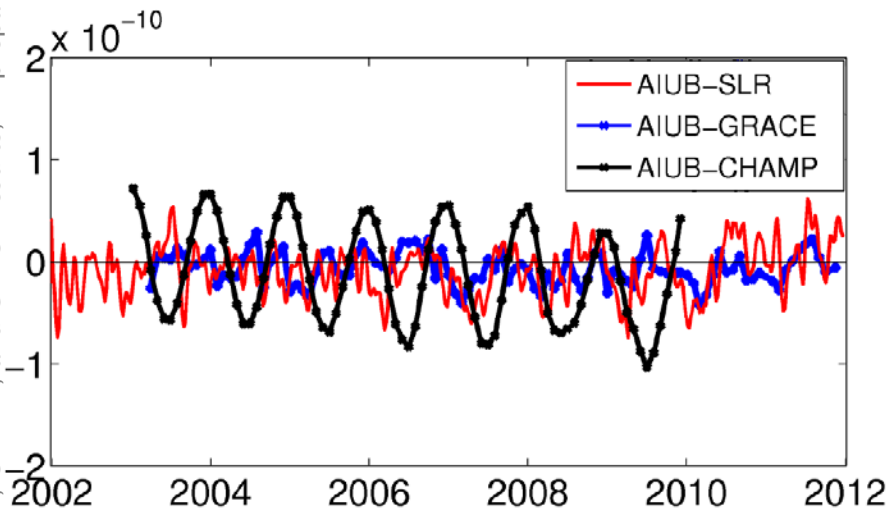
# LAGEOS-only vs. multi-SLR Lösungen

Sošnica, K., A. Jäggi, D. Thaller, U. Meyer, G. Beutler (2014): Time-variable Earth's gravity field from SLR and the comparison with polar motion, CHAMP, and GRACE results, in preparation



# Zeitvariabilität aus multi-SLR Lösungen

Sošnica, K., A. Jäggi, D. Thaller, U. Meyer, G. Beutler (2014): Time variable Earth's gravity field from SLR and the comparison with polar motion, CHAMP, and GRACE results, in preparation



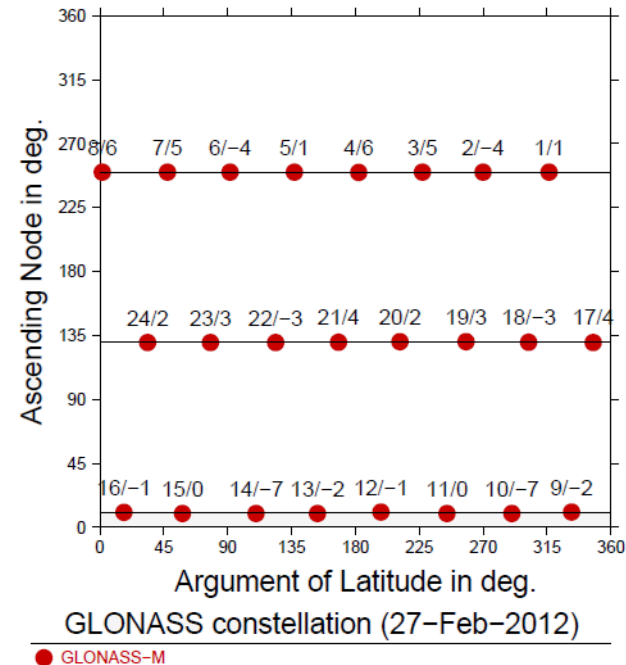
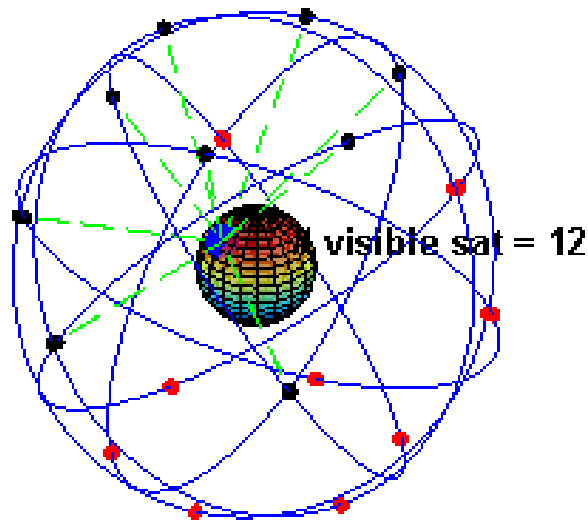
# Simultane Bestimmung aller Parameter

Solution type		X pole [ $\mu\text{as}$ ]		Y pole [ $\mu\text{as}$ ]		LoD [ $\mu\text{s}$ ]		Repeatability [mm]		
		bias	WRMS	bias	WRMS	bias	WRMS	Up	North	East
LAGEOS-1/2	gravity up to 4/4	4.1	160.0	-8.0	155.2	6.1	57.0	11.1	10.2	12.3
LAGEOS-1/2	no gravity	45.8	168.5	-54.1	153.5	77.3	120.5	10.9	10.0	12.4
SLR-LEO	gravity up to 4/4	38.3	267.9	-7.8	217.6	-38.5	105.6	15.3	15.4	15.2
SLR-LEO	no gravity	190.1	437.5	-61.1	315.9	189.6	359.3	15.8	15.6	16.8
multi-SLR	gravity up to 4/4	6.4	148.9	8.5	140.3	6.3	56.3	11.3	11.2	11.7
multi-SLR	no gravity	83.7	153.1	63.3	156.7	75.8	121.7	11.1	11.3	11.8

Im Sinne der **gemeinsamen Bestimmung von Geometrie und Schwere** sollten die SH Koeffizienten nicht nur im Rahmen einer dynamischen Bahnbestimmung zusammen mit den übrigen Bahnparametern bestimmt werden, sondern auch **in einem Guss zusammen mit allen anderen Parametern**. Die Tabelle zeigt, dass insbesondere auch die Erdrotationsparameter davon profitieren.



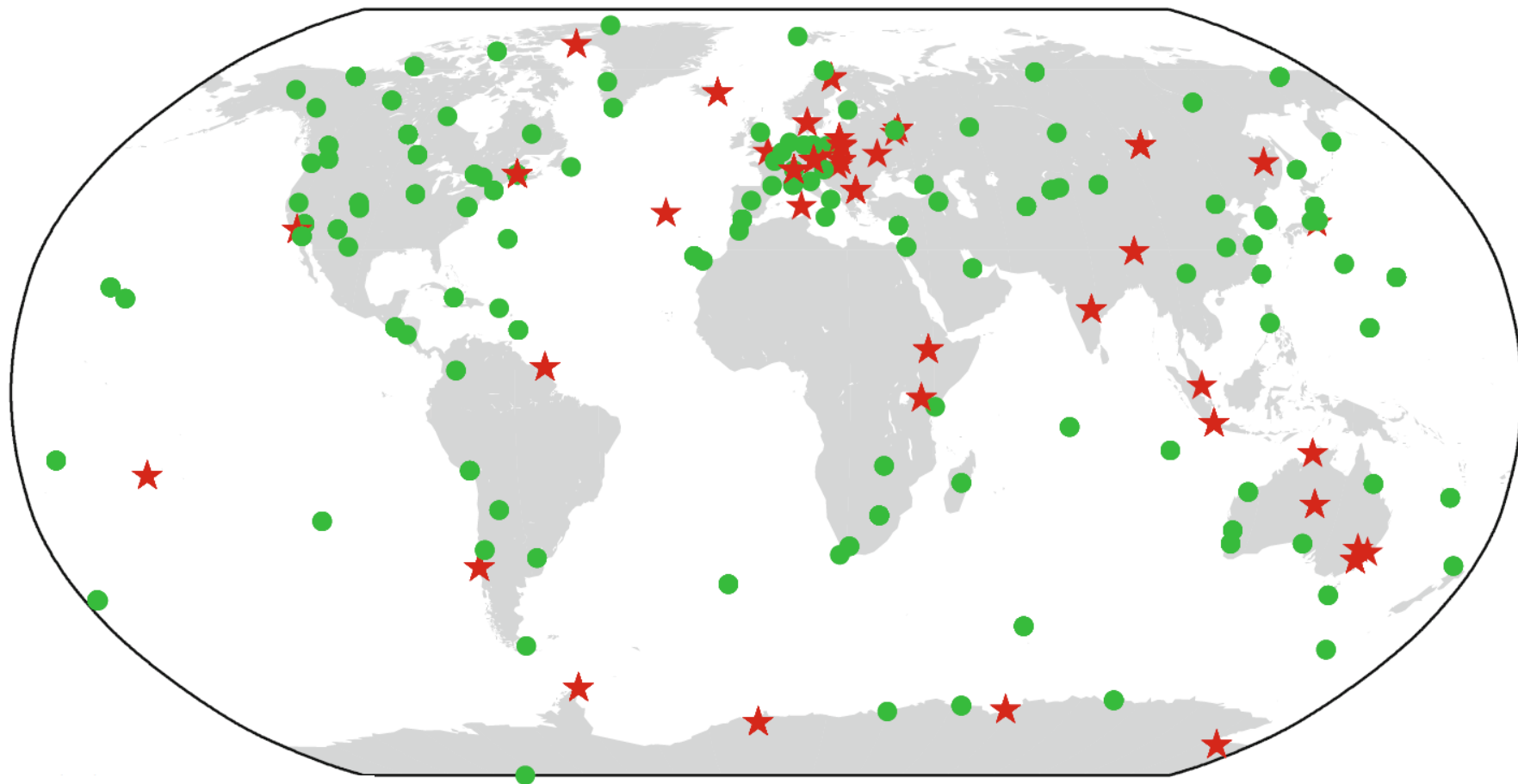
# GNSS Konstellationen



Das **Raumsegment der GNSS** wird kontinuierlich ausgebaut (z.B. Galileo) und erneuert (z.B. GPS, GLONASS), so dass auch neue Frequenzen und Signale benutzt werden können. Das originale Design der GPS Konstellation (24 Satelliten auf 6 Bahnebenen) erlaubt die 3-dimensionale Positionierung auf der Erde und im erdnahen Raum dank mindestens 4 simultan sichtbaren Satelliten.

# Entwicklung des multi-GNSS Stationsnetzes

Dach, R., E. Brockmann, S. Schaer, G. Beutler, M. Meindl, L. Prange, H. Bock, A. Jäggi, L. Ostini  
(2009): GNSS processing at CODE: status report. Journal of Geodesy, 83(3-4), 353-366



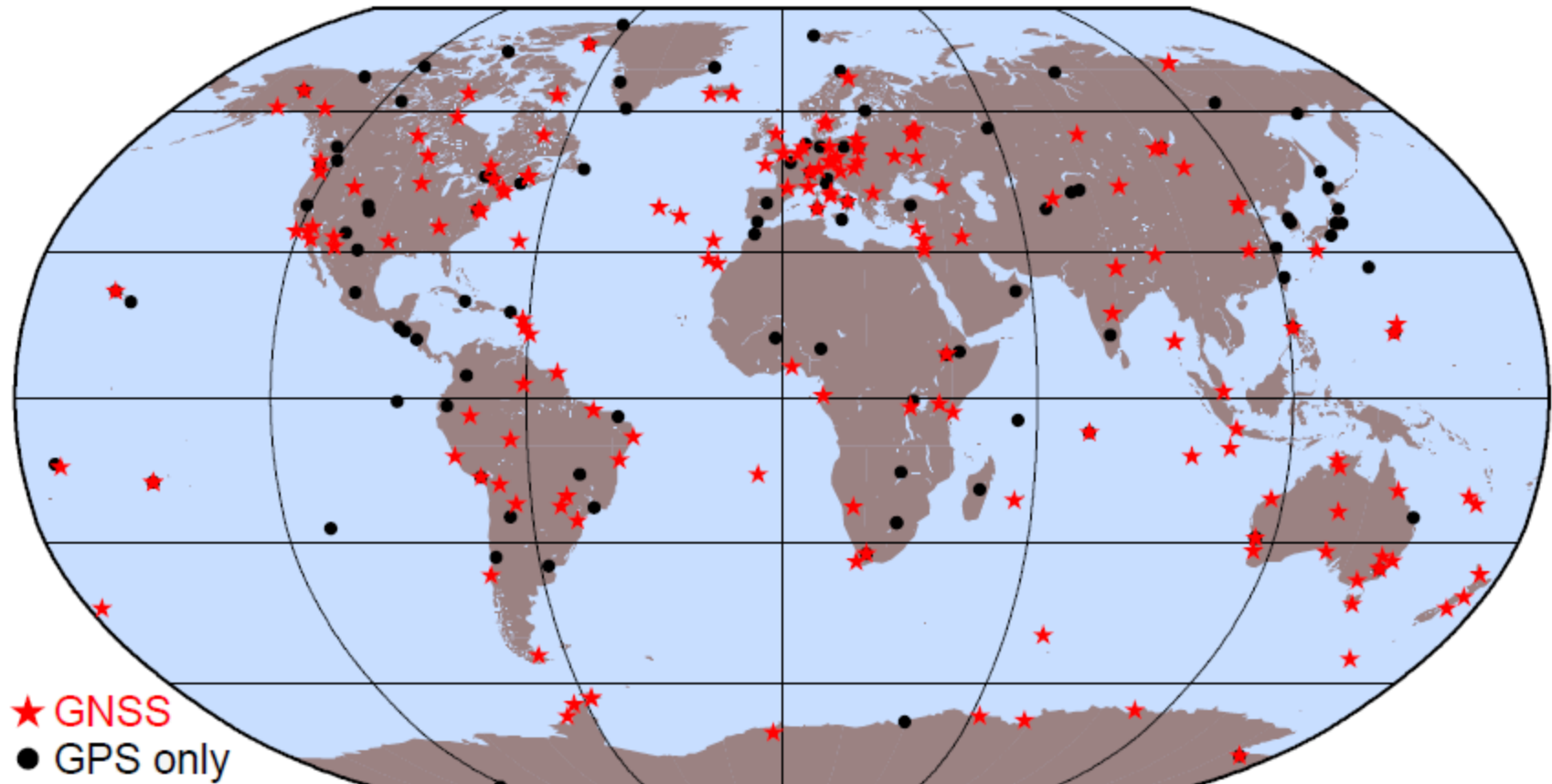
● GPS-only Empfänger

★ Kombinierte GPS-GLONASS Empfänger

IGS Stationen zur Berechnung der  
CODE Final Orbits im Jahr 2009

# Entwicklung des multi-GNSS Stationsnetzes

---

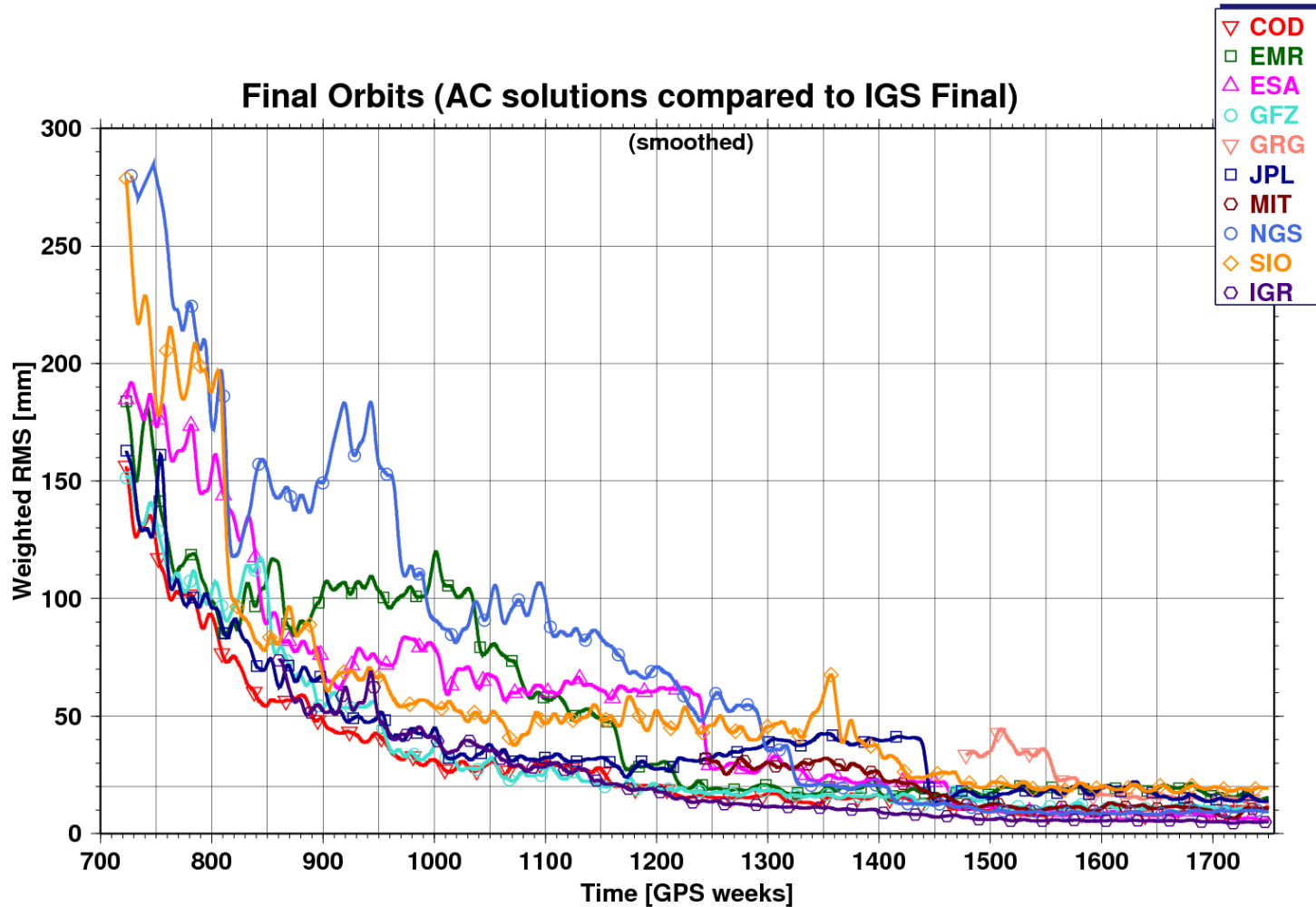


Mehr und mehr multi-GNSS Empfänger sind  
im globalen IGS Netz verfügbar

IGS Stationen zur Berechnung der  
CODE Final Orbits Ende 2011



# Entwicklung der GNSS (GPS) Bahnqualität



NOAA NGS, 3.08.2013 19:28 (GMT)

Die Konsistenz der Lösungen liegt im  
Bereich weniger cm (s. <http://acc.igs.org>)

# Status der Galileo Konstellation

## GIOVE-A:



- #: 1; active: 2005 - 2012
- Weight: 585 kg
- Clocks: 2 Rb

## GIOVE-B:



- #: 1; active: 2008 - 2012
- Weight: 500 kg
- Clocks: 2 Rb + 1 H-Maser



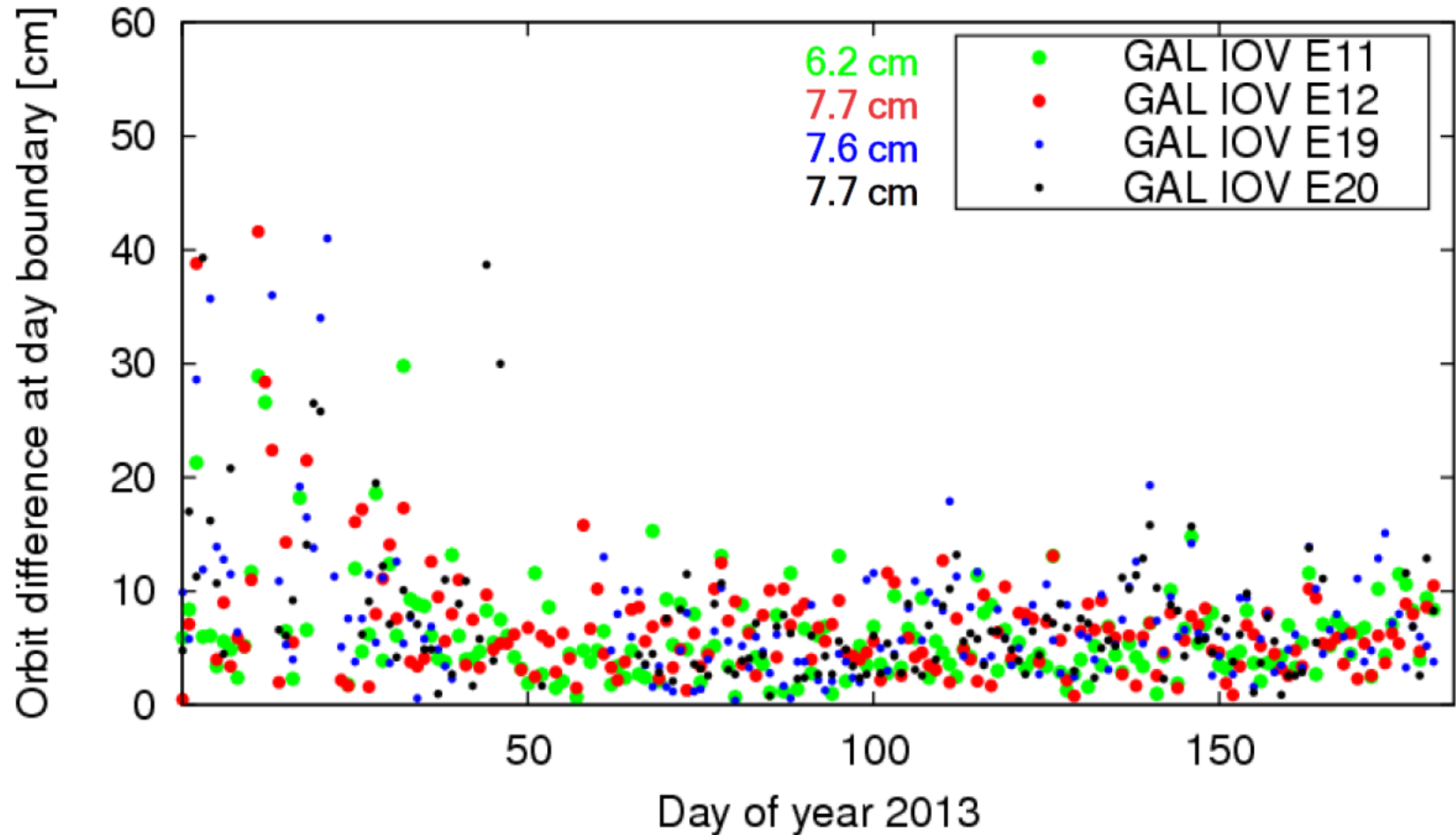
## Galileo IOV:

- Active: 4
- Launched 2011 - 2012
- Weight: 700 kg
- 2 Rb + 2 H-Maser

=> Future plans: Galileo FOC (mid 2014++)

# Galileo Bahnqualität

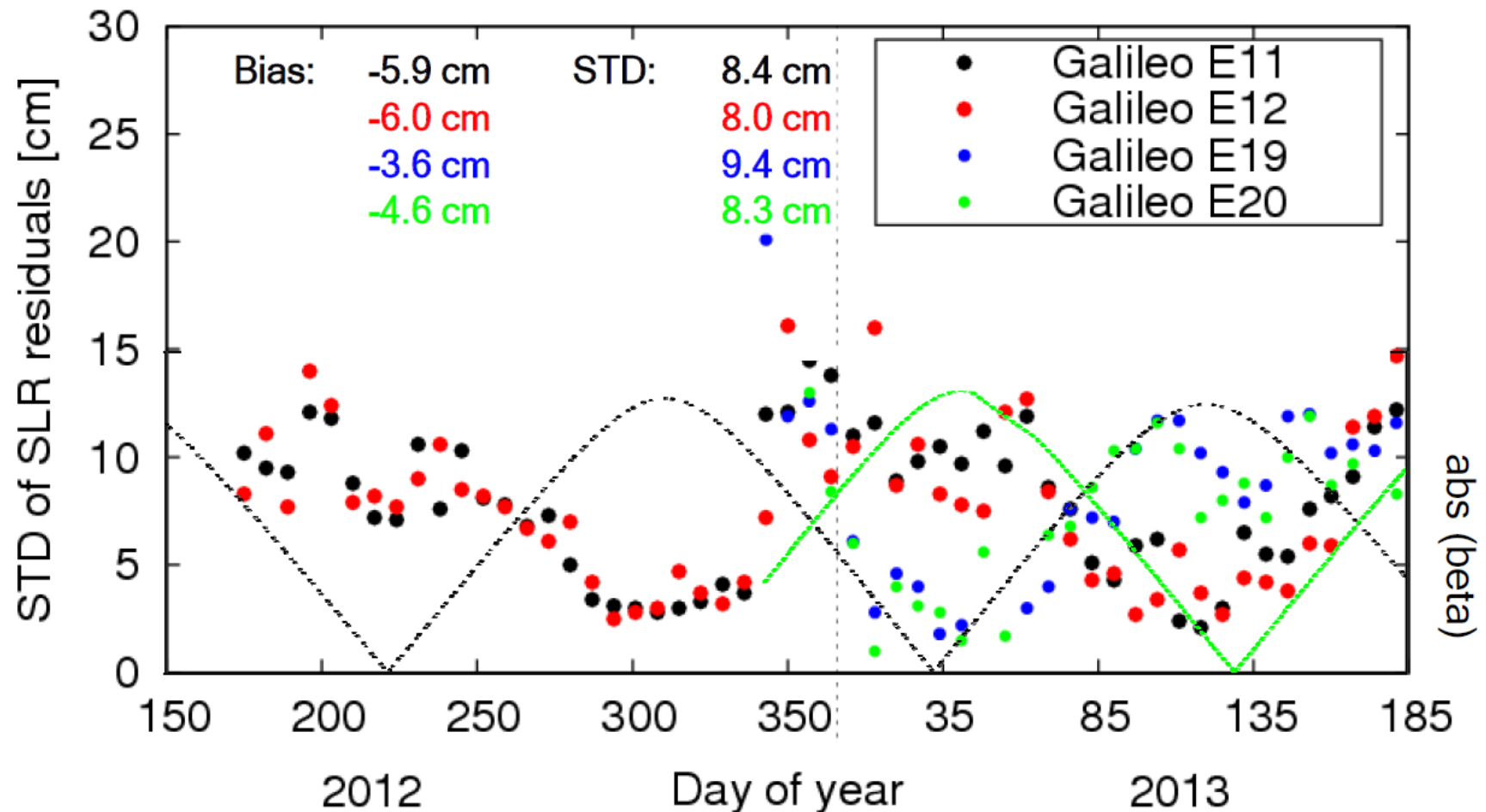
Arclength: 3 days



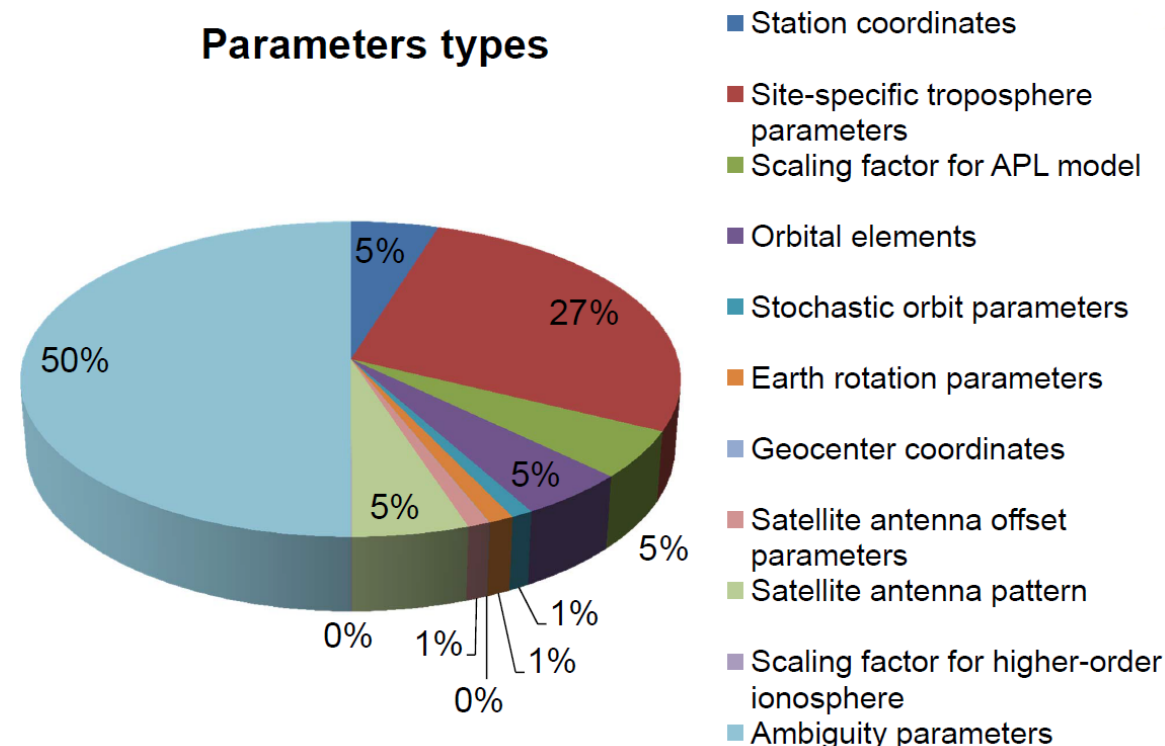


# Galileo Bahnqualität

STD of SLR residuals per week: correlation with beta angle



# Simultane Bestimmung aller Parameter



Eine Vielzahl verschiedener Parameter muss auch bei GNSS **gemeinsam** mit den Bahnparametern bestimmt werden. Allerdings hat die simultane Bestimmung von Geometrie und Schwere hier noch nicht Einzug erhalten, obwohl die GNSS Satellitenbahnen genauso Lösungen einer Bewegungsgleichung sind und auch durchaus sensitiv auf die tiefen Terme des Erdschwerefeldes reagieren ...

# Strahlungsdruckmodellierung

## Empirisches Strahlungsdruckmodell:

$$\mathbf{a}_{\text{srp}} = \mathbf{a}_{\text{srp},0} + D(u) \mathbf{e}_D + Y(u) \mathbf{e}_Y + X(u) \mathbf{e}_X$$

mit

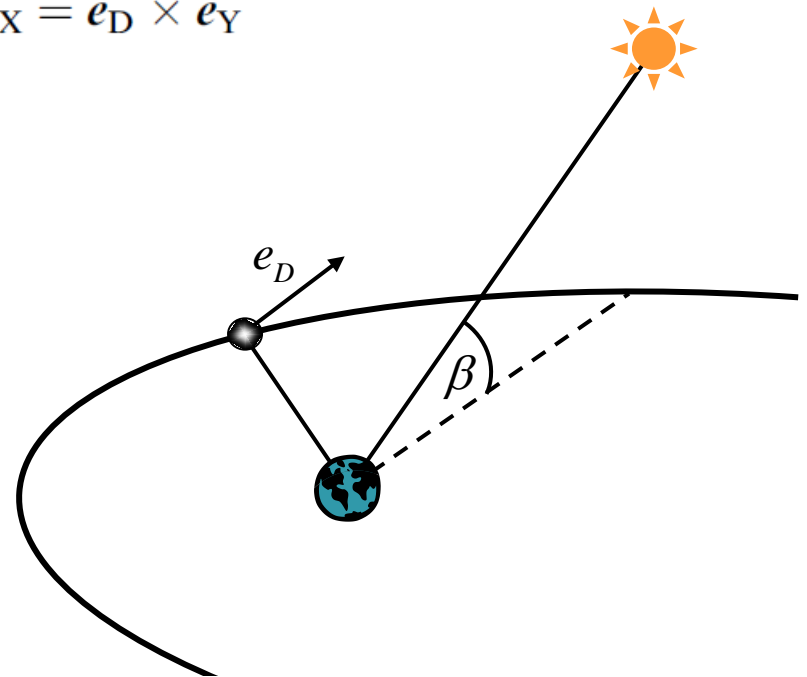
$$\mathbf{e}_D \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\mathbf{r}_s - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|} \quad \mathbf{e}_Y \stackrel{\text{def}}{=} -\frac{\mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_D}{|\mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_D|} \quad \mathbf{e}_X \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{e}_D \times \mathbf{e}_Y$$

und

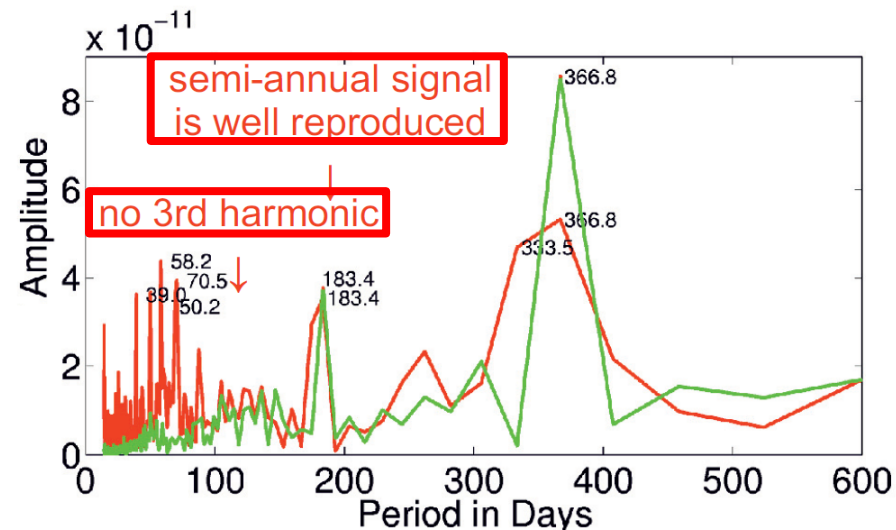
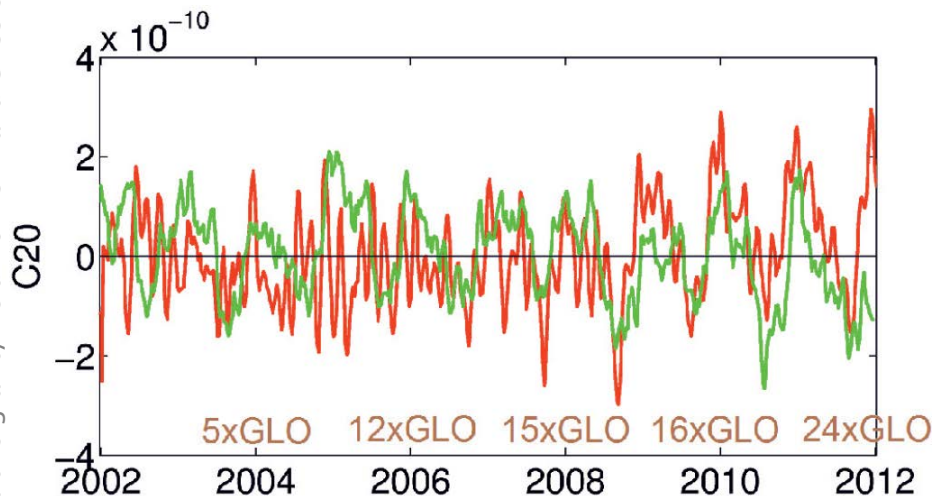
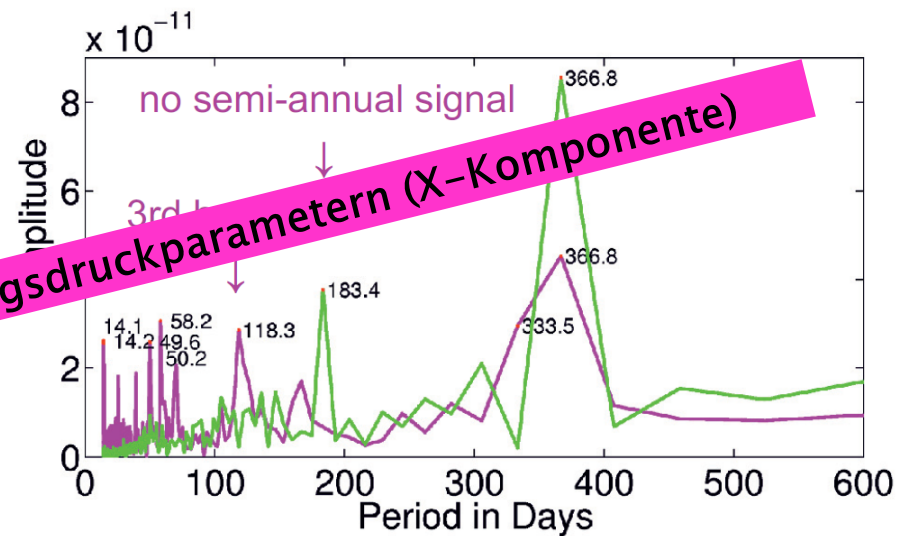
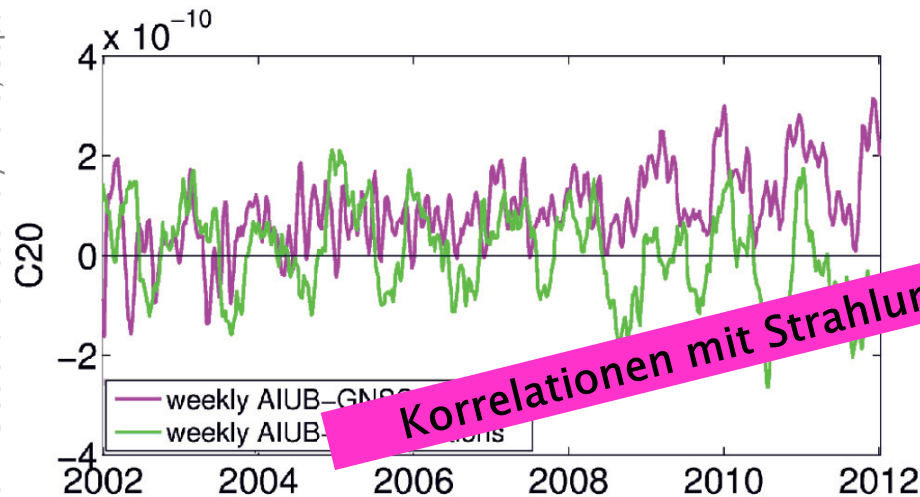
$$D(u) = D_0 + D_c \cos u + D_s \sin u$$

$$Y(u) = Y_0 + Y_c \cos u + Y_s \sin u$$

$$X(u) = X_0 + X_c \cos u + X_s \sin u$$



# Zeitvariabilität aus multi-GNSS Lösungen



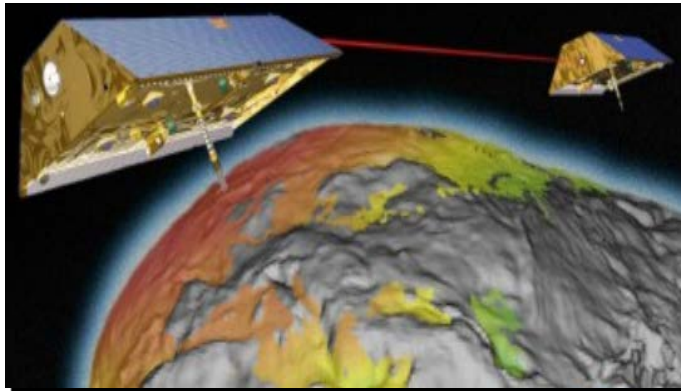
# (Aktuelle) Schwerefeldmissionen

---



**CHAMP (2000-2010)**

**CH**allenging  
**M**inisatellit  
**P**ayload



**GRACE (2002-201?)**

**G**ravity  
**R**ecovery  
**A**nd  
**C**limate  
**E**xperiment

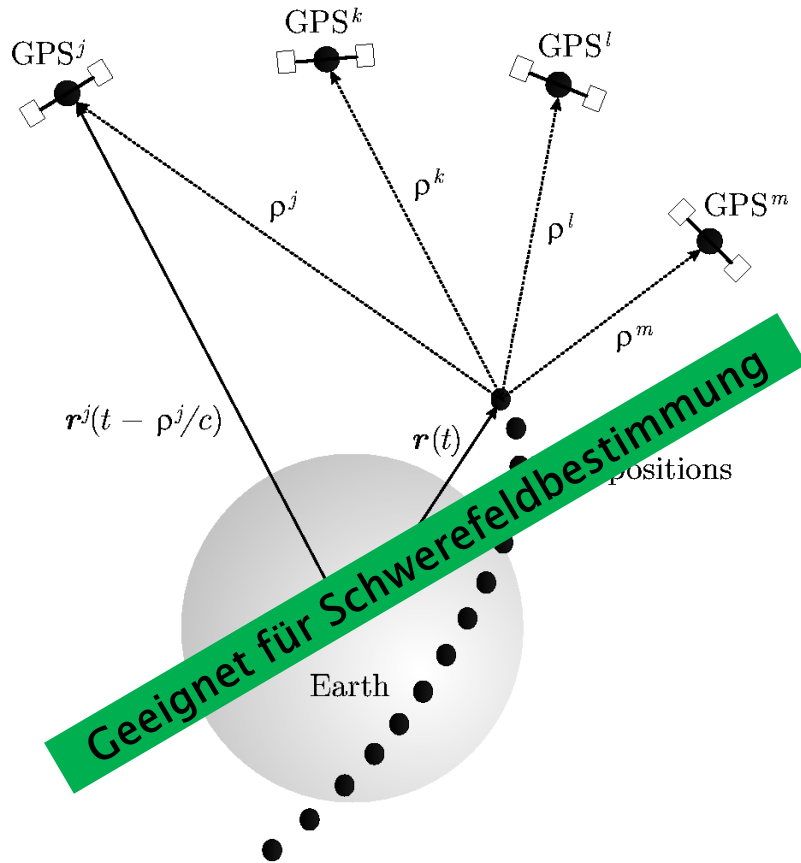


**GOCE (2009-2013)**

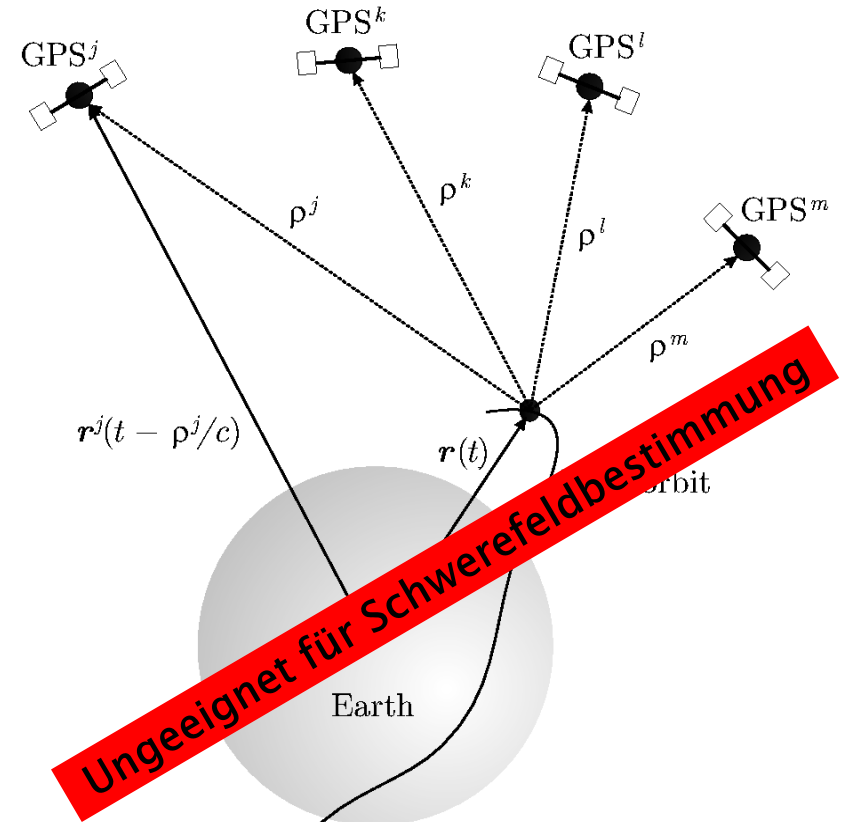
**G**ravity Field & Steady-state  
**O**cean  
**C**irculation  
**E**xplorer



# Kinematische vs. dynamische Bahnen



**Kinematische Bahnen** liefern nicht die höchste Bahngenauigkeit, können aber **unabhängig** von Krätemodellen bestimmt werden

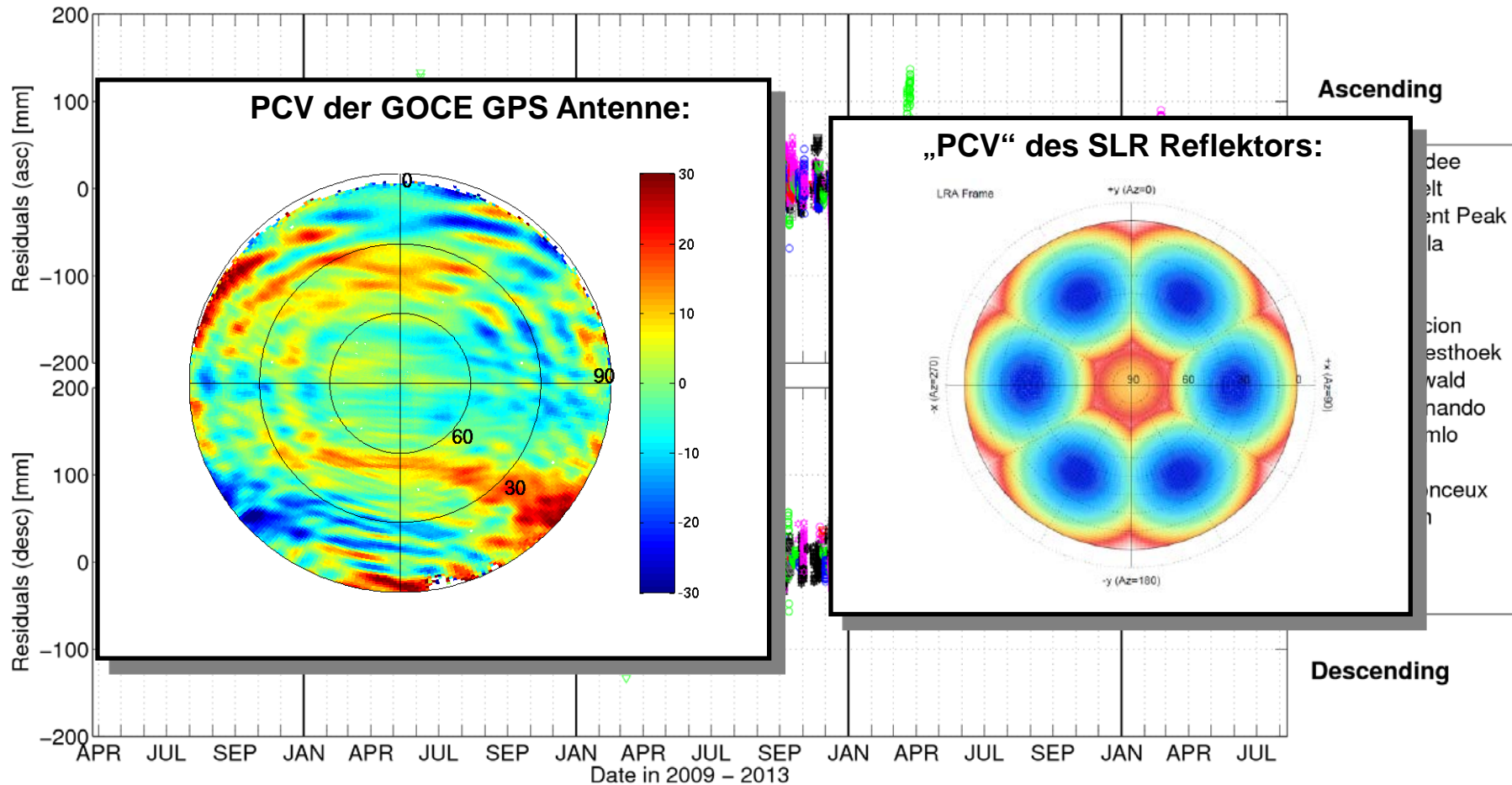


**Reduziert-dynamische Bahnen** liefern eine Bewegungsgleichung, in der die Bahnhöhe, das Sternmodell **abhängig** von, das Sternmodell ist eine gute dynamische Modellierung

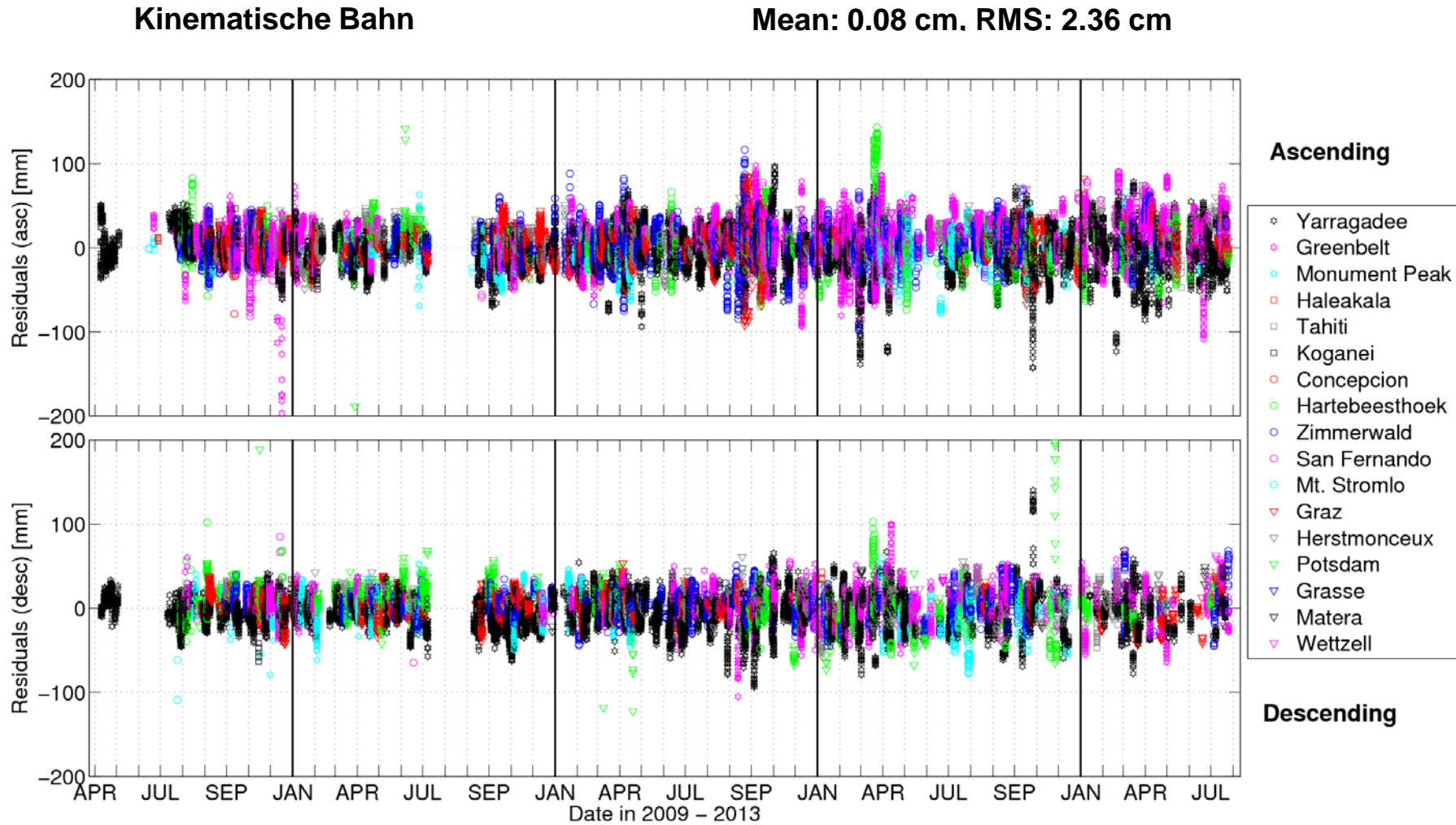
# Bahngenauigkeit von GOCE

Reduziert-dynamische Bahn

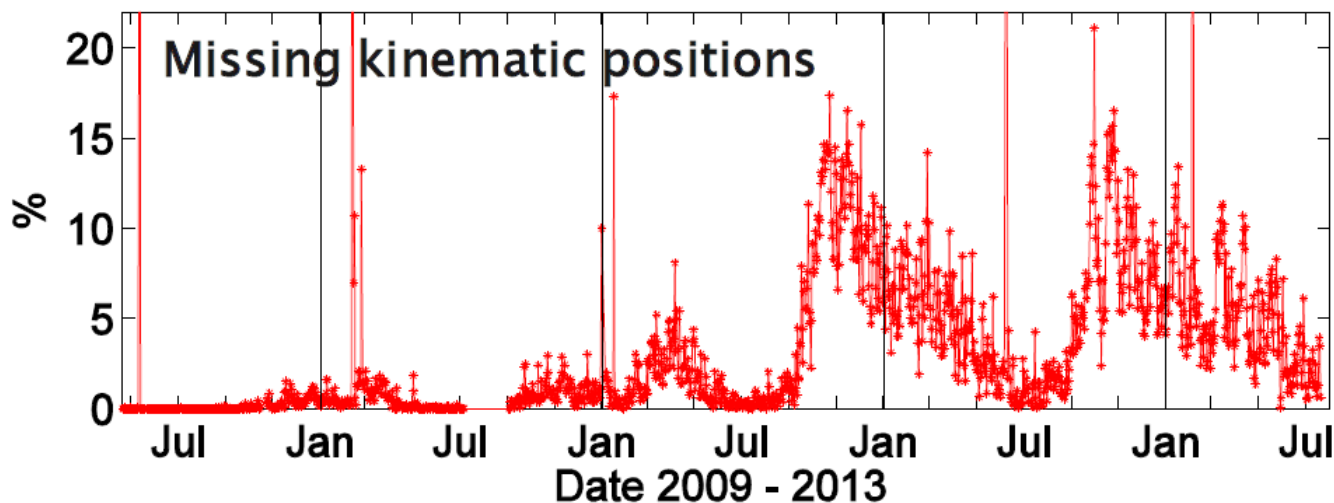
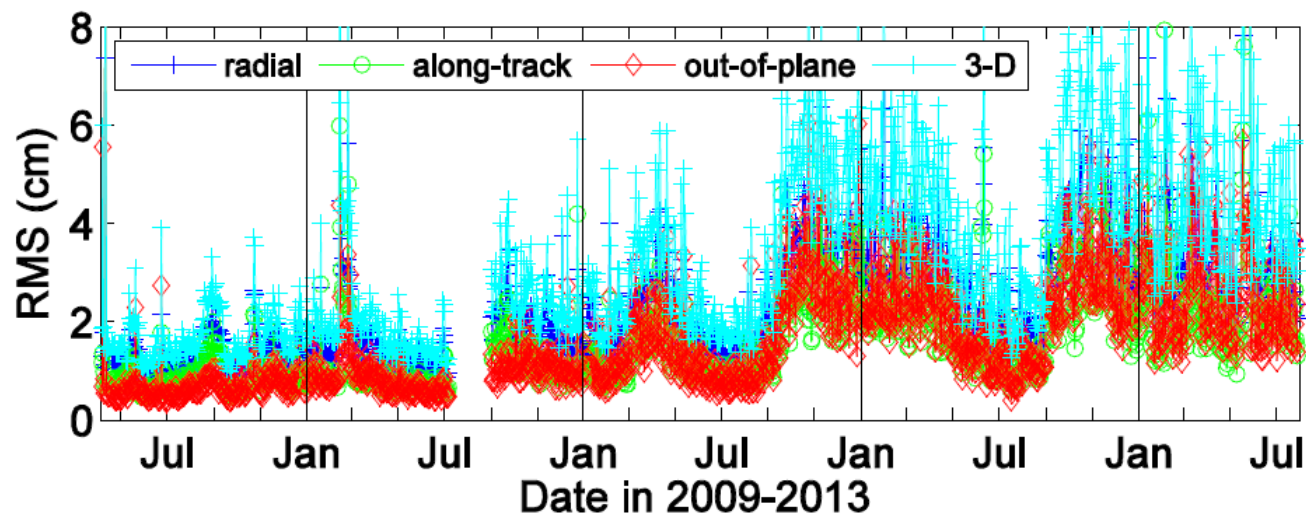
Mean: 0.15 cm, RMS: 1.79 cm



# Bahngenauigkeit von GOCE

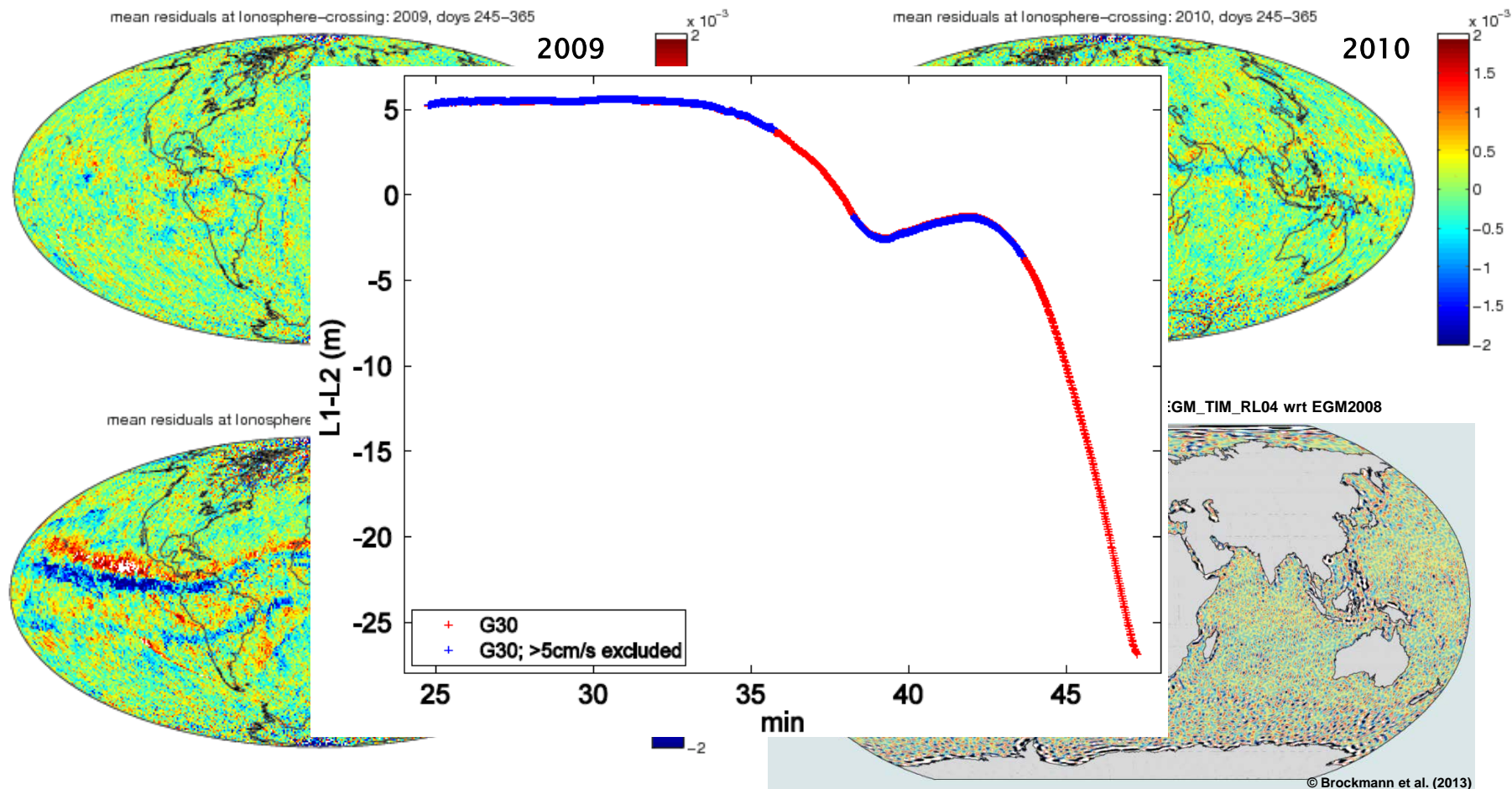


# Bahnqualität von GOCE





# Artefakte der Bahnbestimmung im Schwerefeld

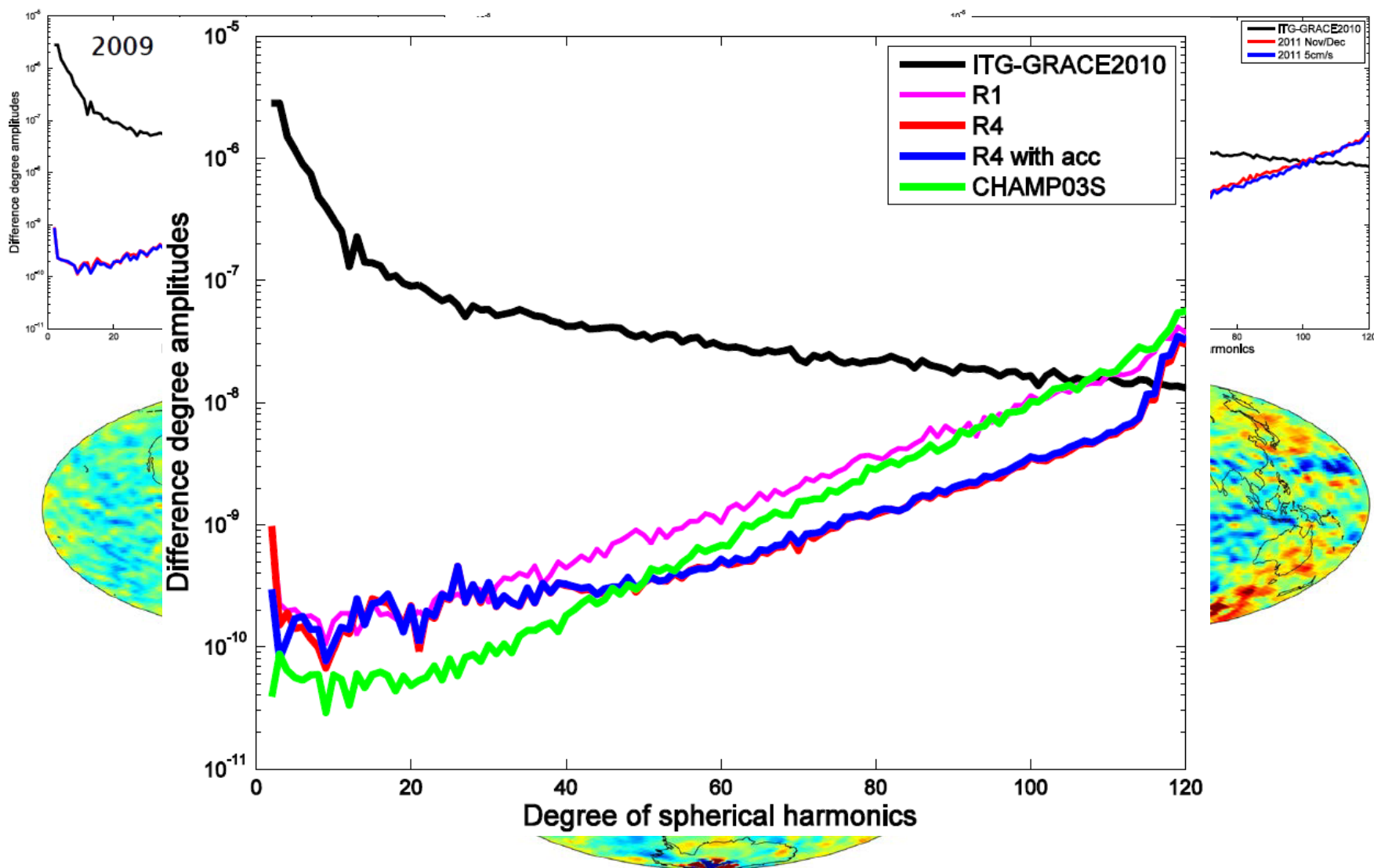


Die Geoiddifferenzen zu ITG-GRACE2010 (rechts unten, Farbskala  $\pm 5\text{cm}$ ) zeigen, dass sich kleine systematische Fehler in der Bahnbestimmung problemlos bis in die Schwerefeldlösungen fortpflanzen können.

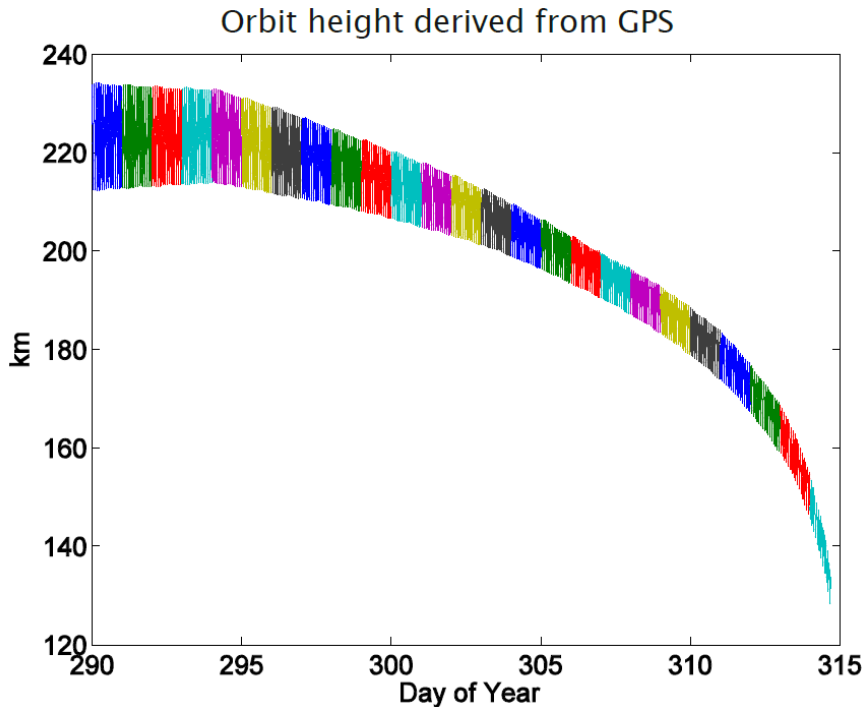


# Artefakte der Bahnbestimmung im Schwerefeld

Bock, H., A. Jäggi, U. Meyer, G. Beutler, J. van den IJssel (2013): GPS-only gravity field determination from GOCE data. IAG Scientific Assembly 2013, Sept 01–06

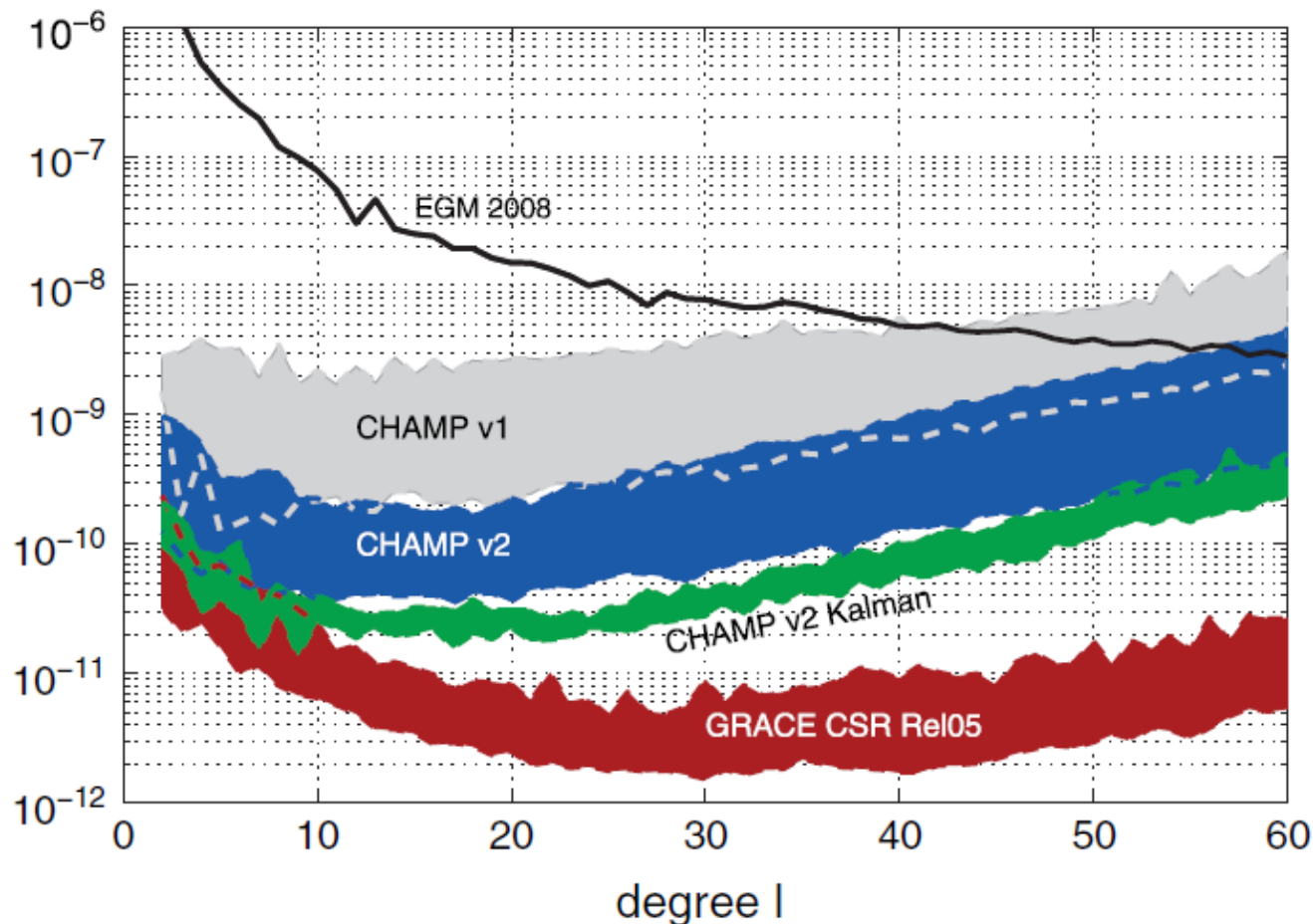


# Die letzten Tage von GOCE



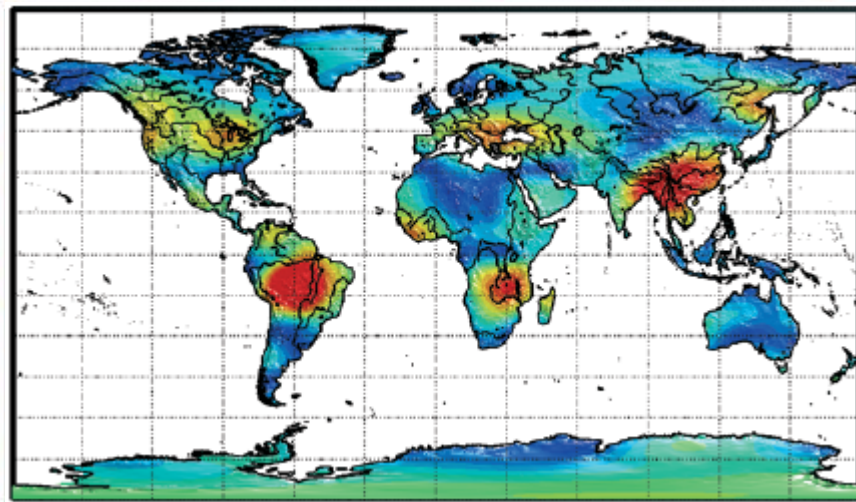
- 21 October: 224 km: Offizielles Ende der Mission, kein weiterer Treibstoff
- 10 November: 130 km: Letzte verfügbare GPS Messung: 17:15:20 UTC
- 11 November: 80 km: GOCE verglüht kurz nach 0:16 UTC in der Atmosphäre

# Zeitvariabilität aus GPS – CHAMP

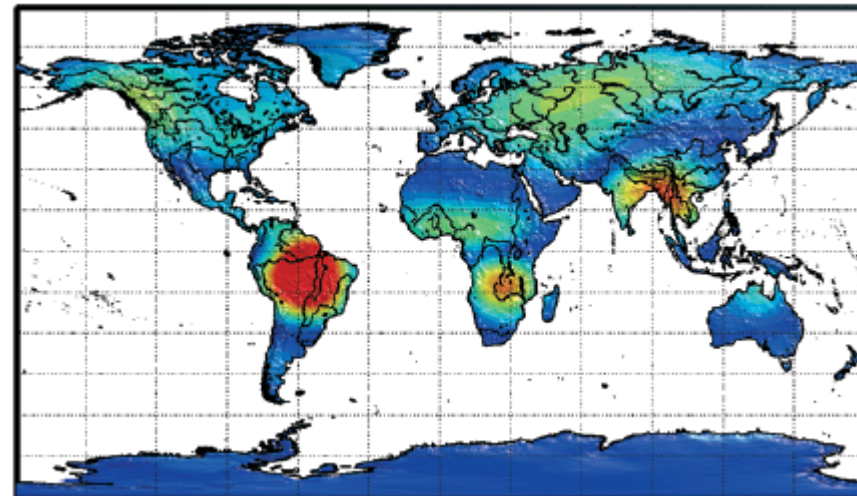


CHAMP GPS und GRACE K-Band Lösungen „spielen“ grundsätzlich in einer anderen Liga. Dank einer **rigorosen Reprozessierung** der CHAMP GPS Daten gibt es im langwelligen Bereich nun aber Berührungspunkte.

# Zeitvariabilität aus GPS – CHAMP



CHAMP GPS

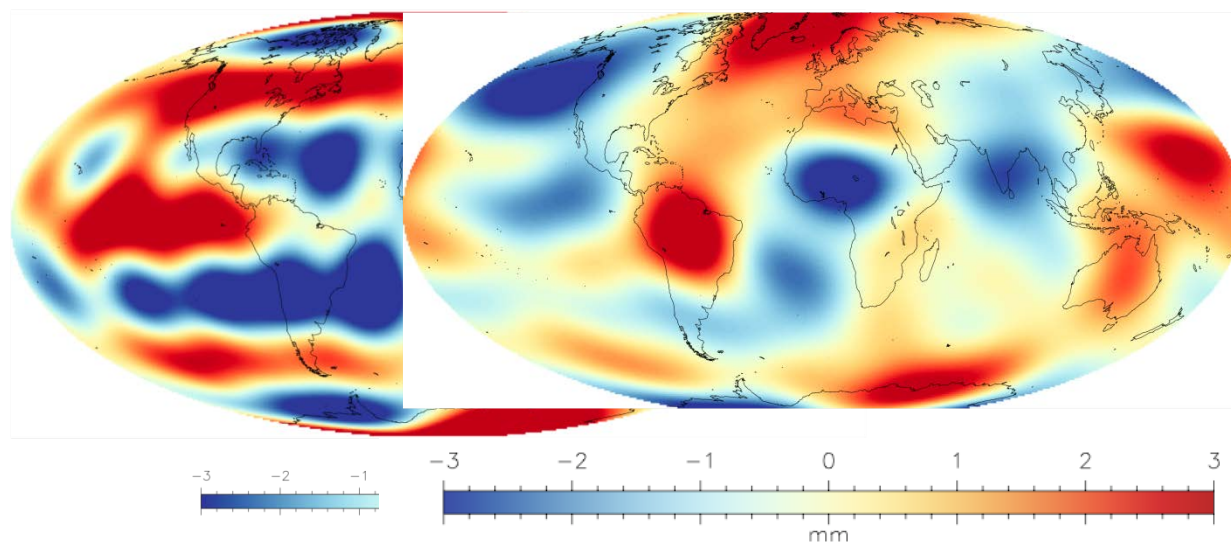


GRACE K-Band

Mittels spezieller Behandlung (**Kalman-Filter**) lässt sich das jährliche Signal zumindest im langwelligen Bereich einigermaßen gut erfassen. Dies ist ein erster, vielversprechender Schritt zur Ausreizung künftiger Gap-Filler Missionen, z.B. Swarm.

# Zeitvariabilität aus GPS – GOCE

Freie Lösung      Fit eines jährlichen Signals

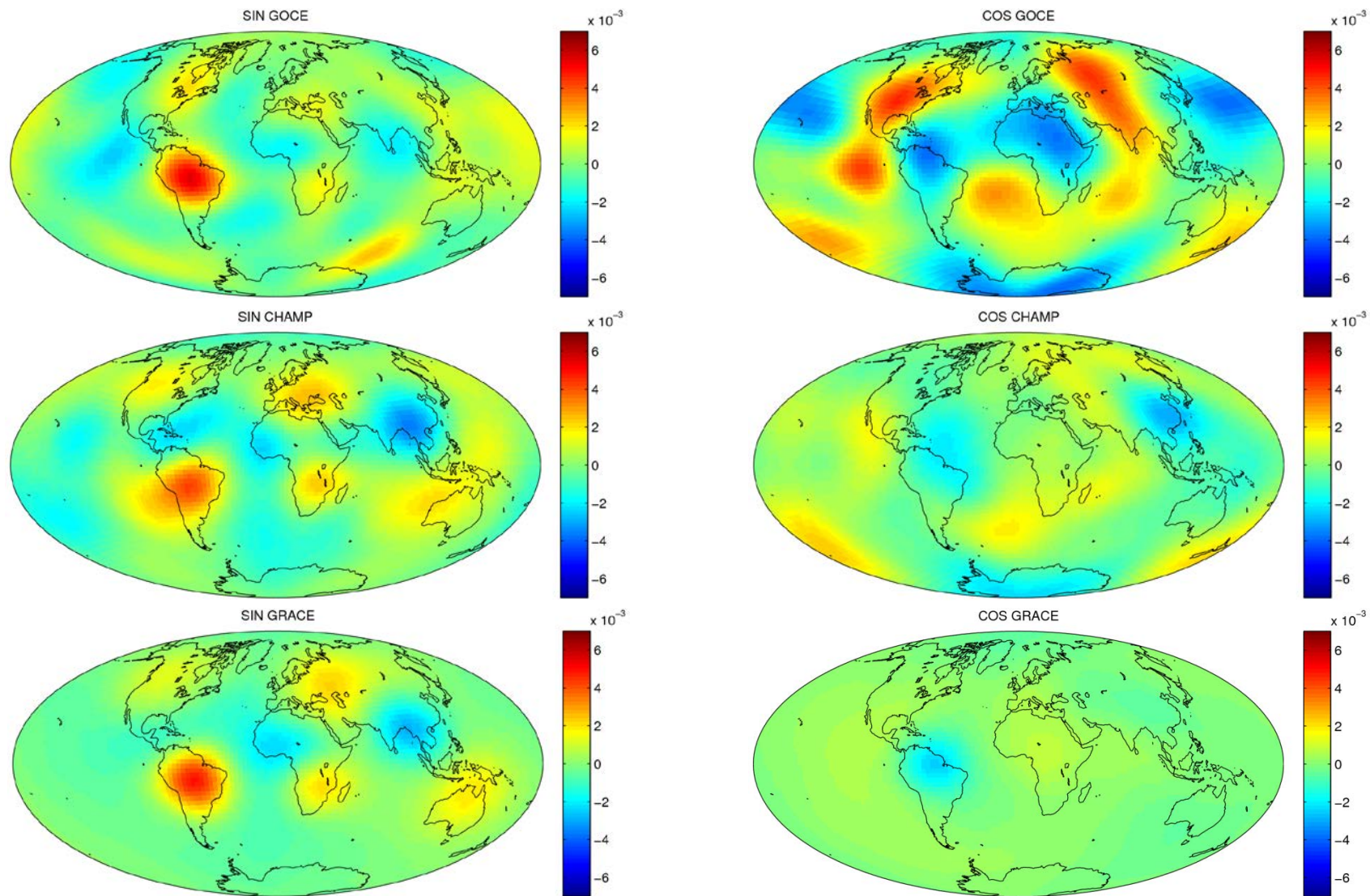


© Visser et al. (2013)

Ohne spezielle Behandlung (**Kalman-Filter, einfacher Fit**) lassen sich die jährlichen Signale leider kaum erkennen. Die tiefe Bahnhöhe von GOCE bietet gegenüber CHAMP kaum einen Vorteil für die Bestimmung der langwelligen Strukturen des Erdschwerefeldes aus den GPS Messungen.

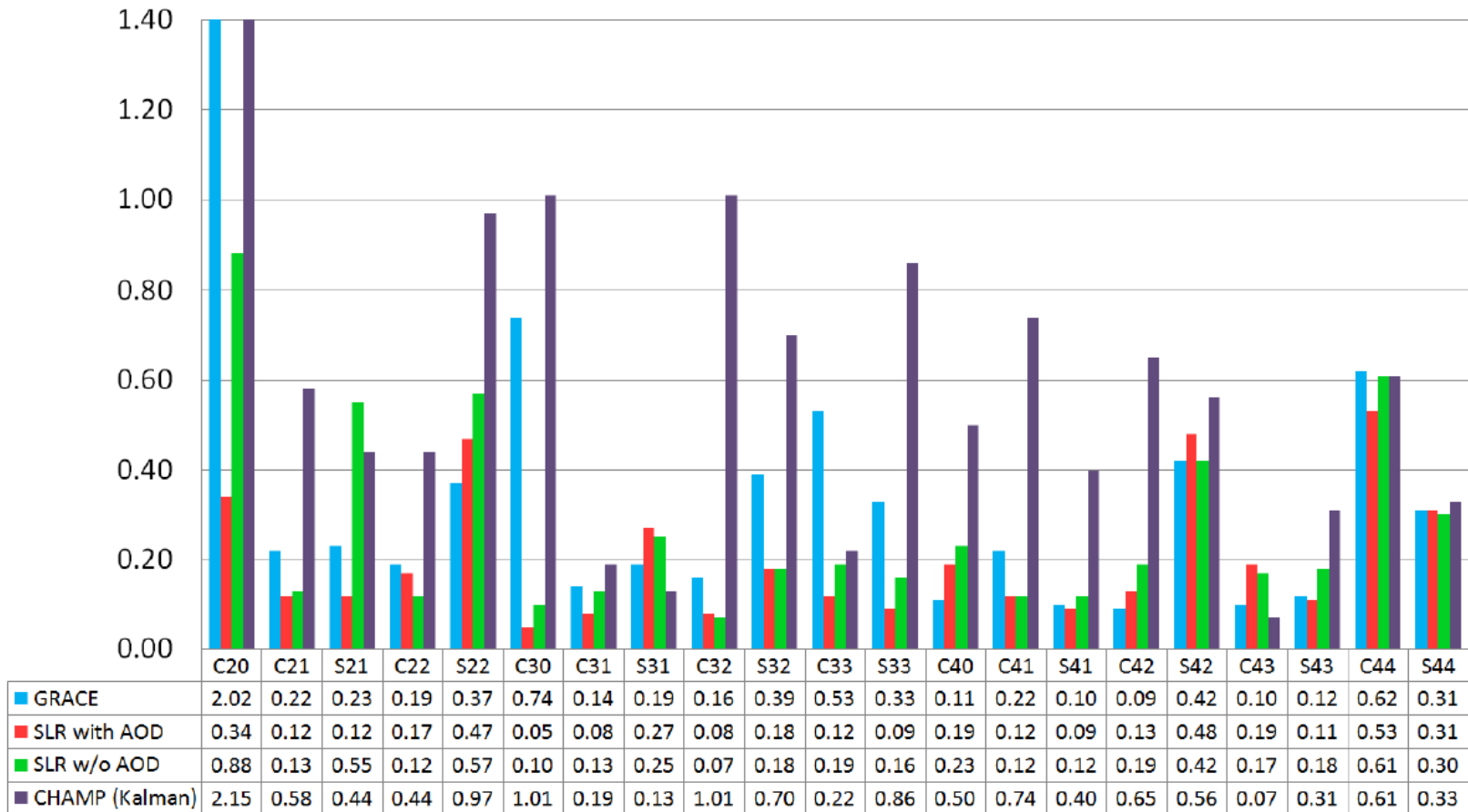


# Zeitvariabilität aus GOCE, CHAMP, GRACE



# Zeitvariabilität aus verschiedenen Techniken

Amplitudes of annual signals of low gravity field coefficients (x1e-10)



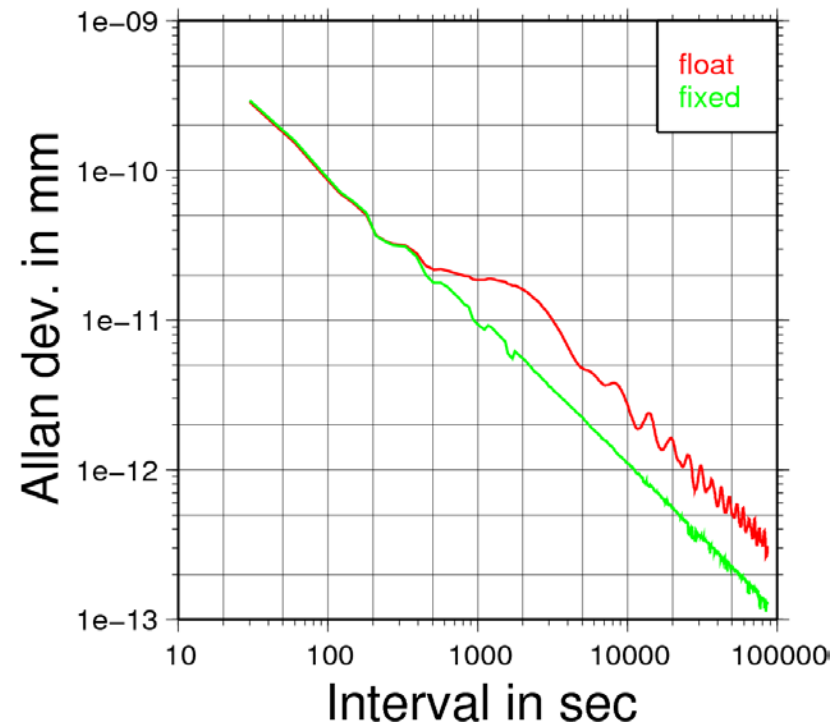
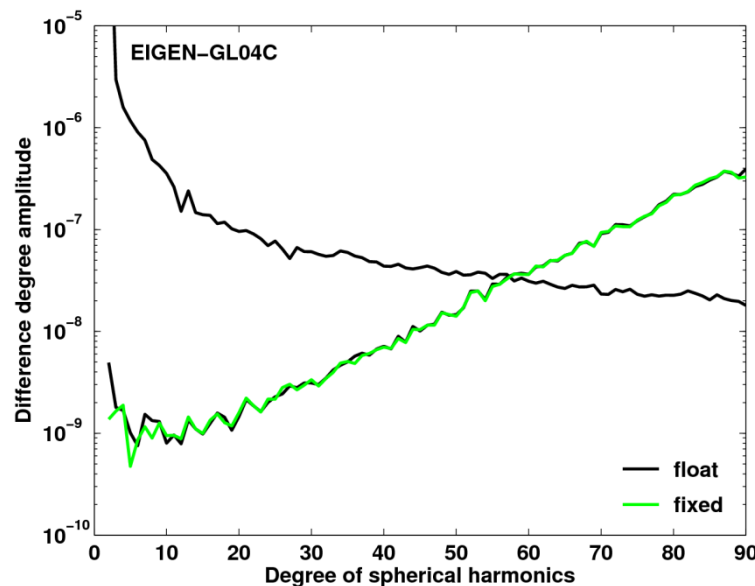
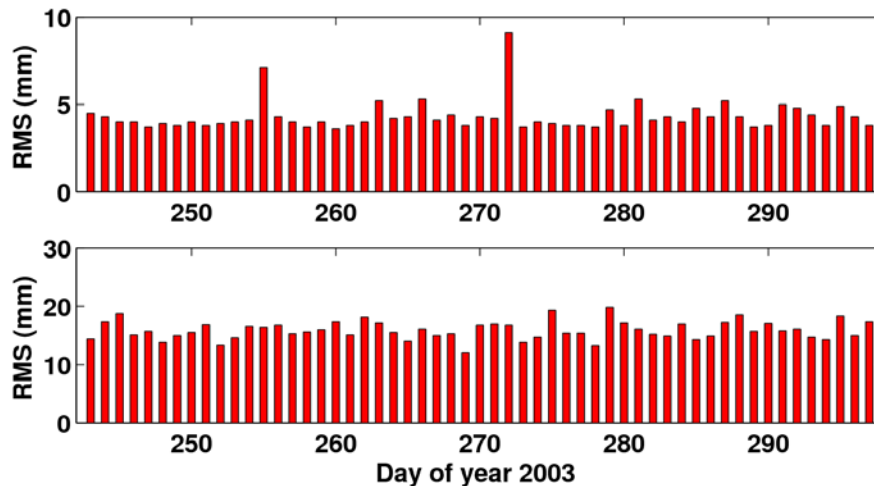
Die Bestimmung der Zeitvariabilität aus GPS hl-SST bietet sicherlich noch Potential für Verbesserungen. Man darf auf Swarm gespannt sein.

# Swarm als “gap-filler”: GPS-Basislinien



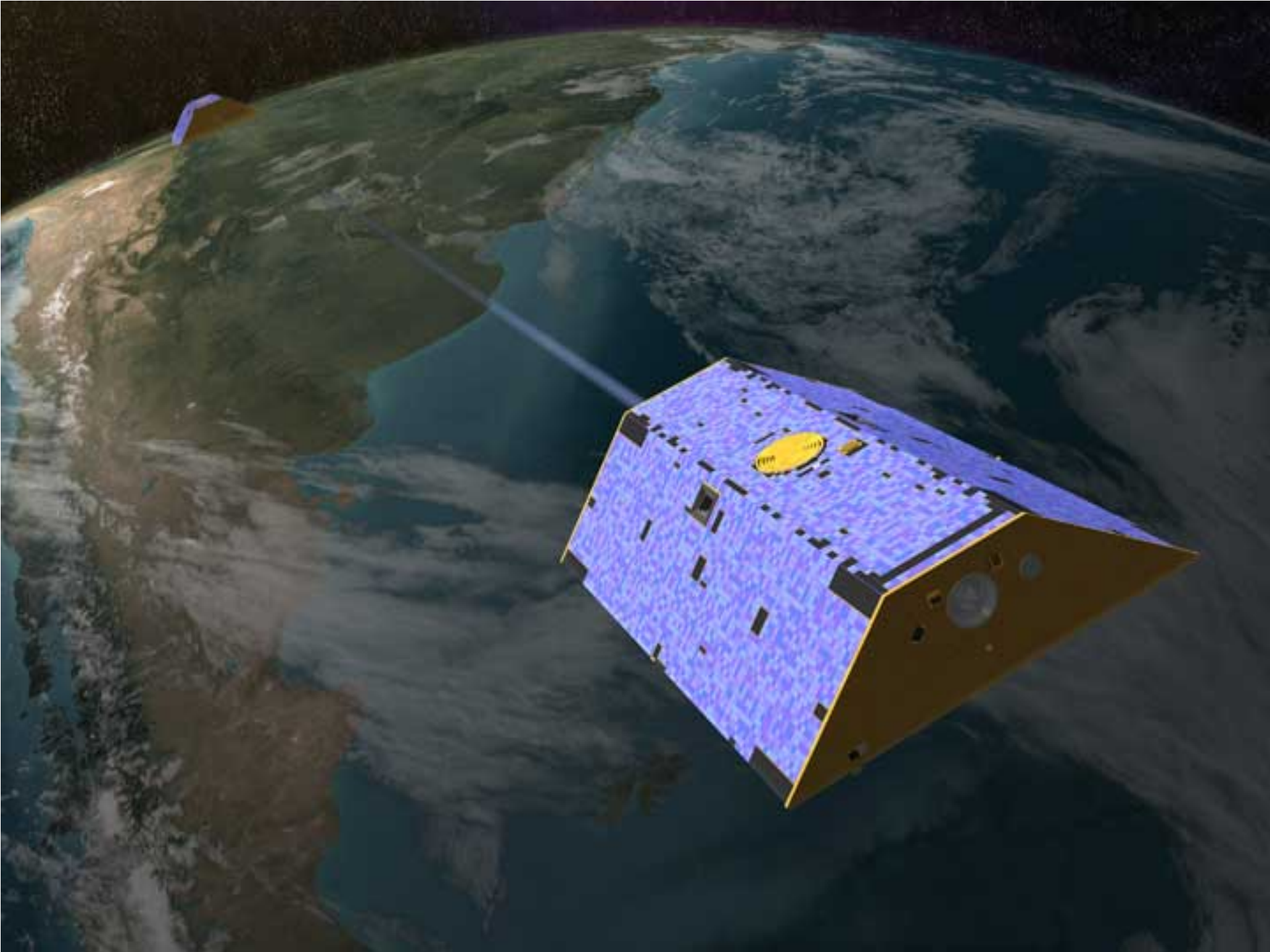
- Start: **November 2013**
- 3 Satelliten: GPS & ACC, Formationsflug
- Bahnbestimmung der Konstellation (beinhaltet Vektoren zw. Satelliten)
- Optimale Bestimmung des zeitvariablen Schwerefelds
- In den nächsten Jahren eine der **wenigen** Missionen zur Bestimmung des Erdschwerefelds

# Erfahrungen von GRACE: GPS-Basislinien



- **Fixieren der Mehrdeutigkeiten beeinflusst bloss den langwelligigen Teil des Spektrums**
- **Man darf aber trotzdem sehr gespannt auf Swarm sein**







# Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?

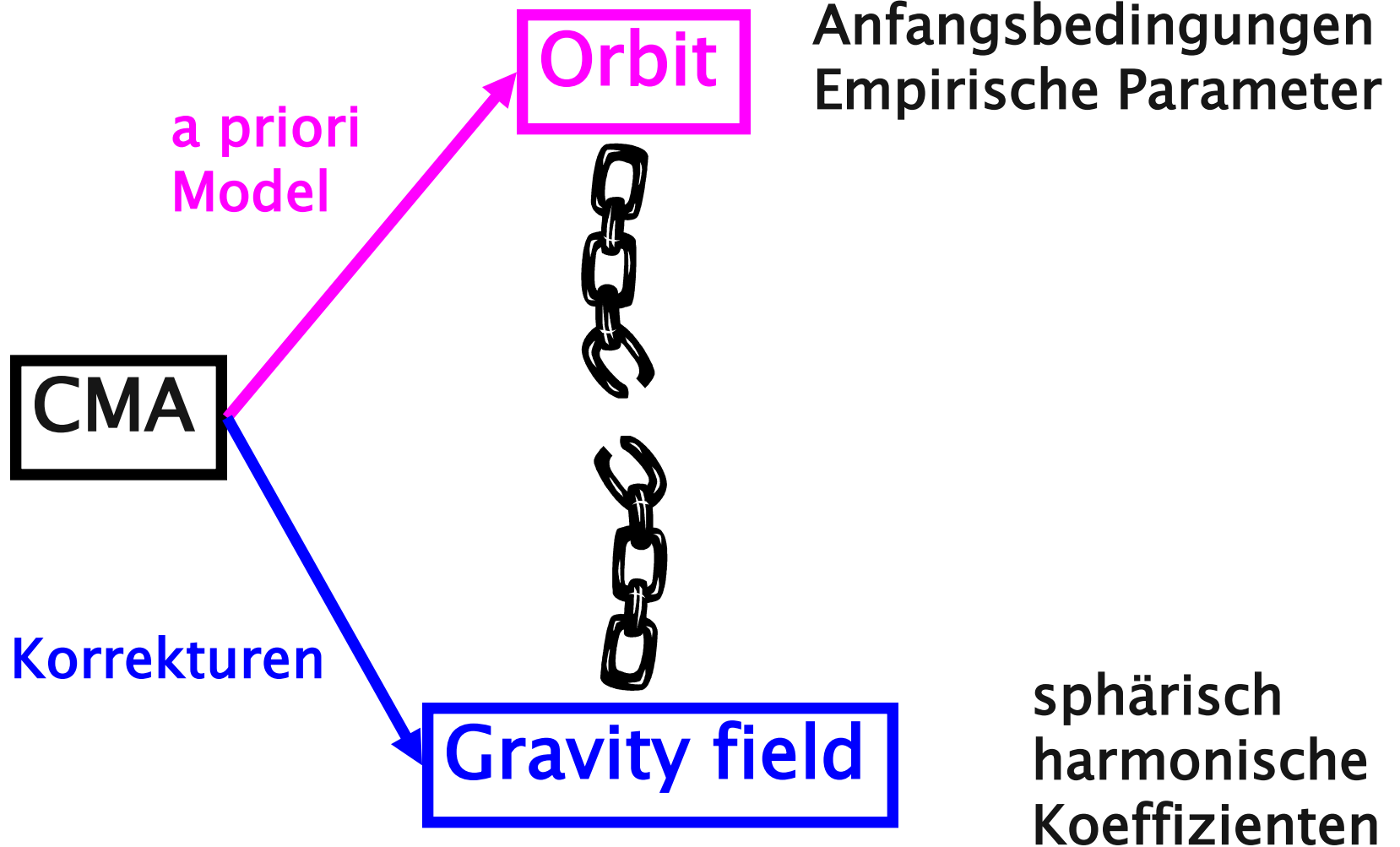
---



## Nicht-lineares Parameterbestimmungsproblem

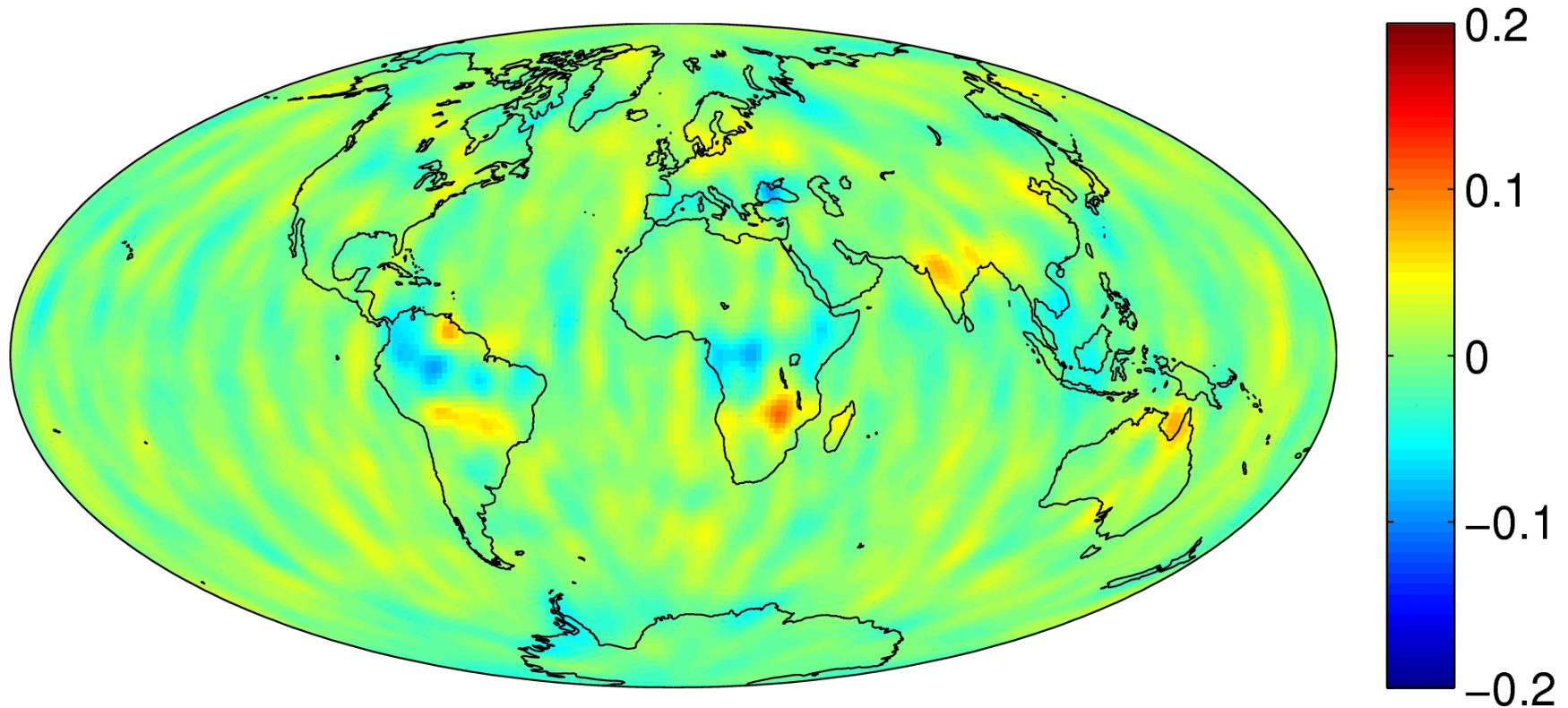
- A priori Modell (Linearisierung)
- Beobachtungen
- Regularisierung (a priori Wissen mittels Pseudo-Beobachtungen)

# Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?



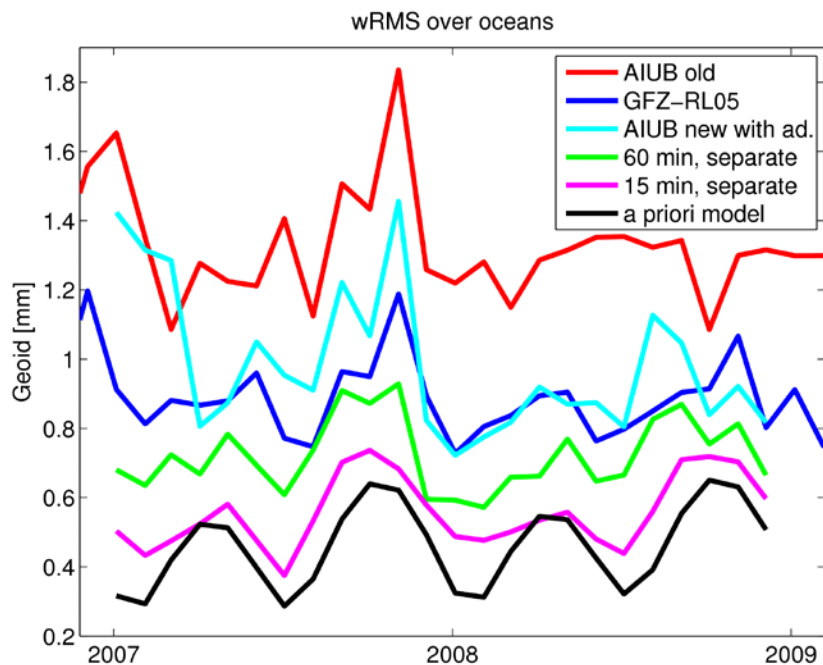
# Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?

Separate solution, 15 min



# Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?

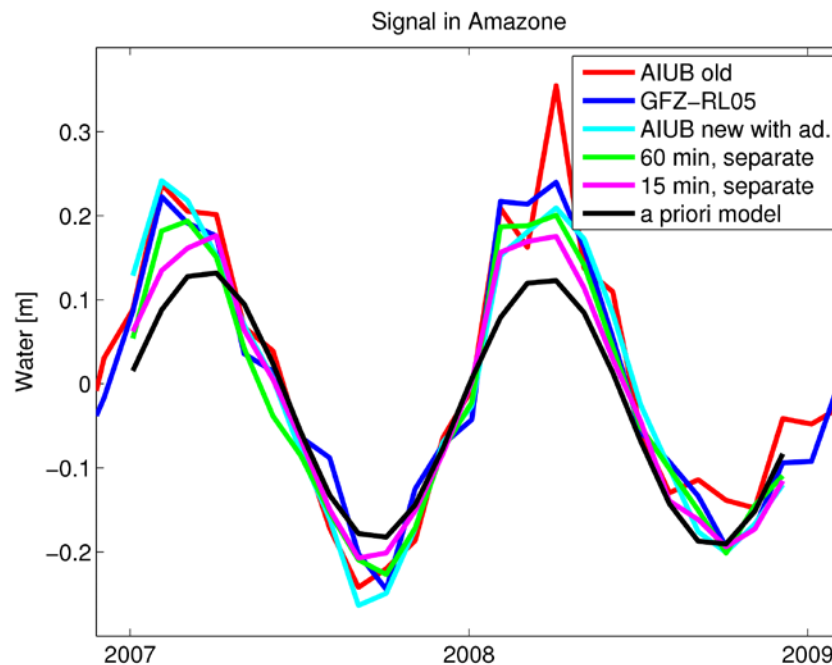
Meyer, U., A. Jäggi, H. Bock, G. Beutler (2013): The role of a priori information in gravity field determination. EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria, April 7–12, 2013



Signal

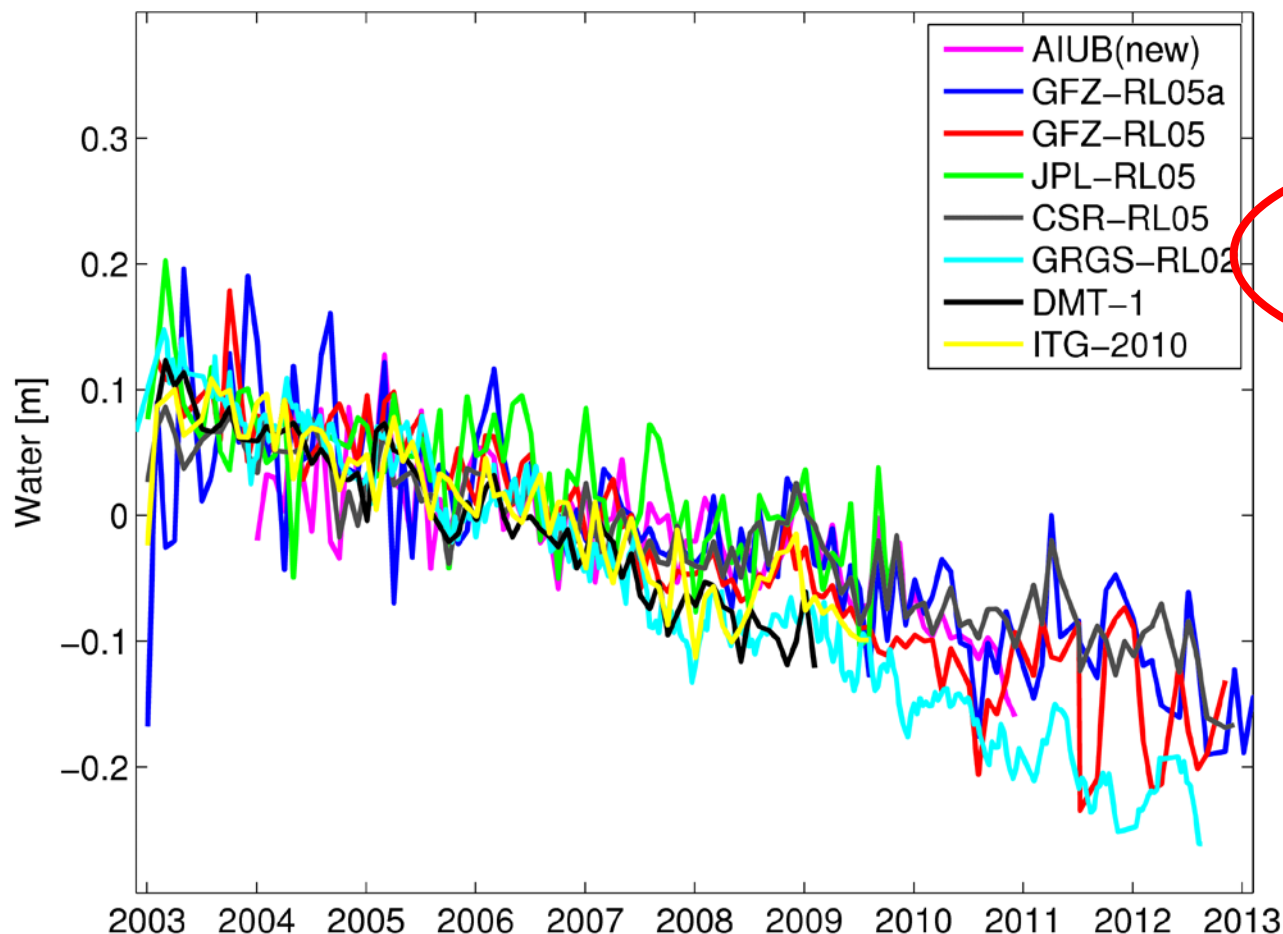
Rauschen

Signaldämpfung ?



# Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?

Signal (Eismassenverlust in Grönland)



AIUB:  $-20 \pm 1.9$  mm/y

GFZa:  $-22 \pm 1.6$  mm/y

GFZ:  $-31 \pm 1.1$  mm/y

JPL:  $-20 \pm 2.3$  mm/y

CSR:  $-19 \pm 0.8$  mm/y

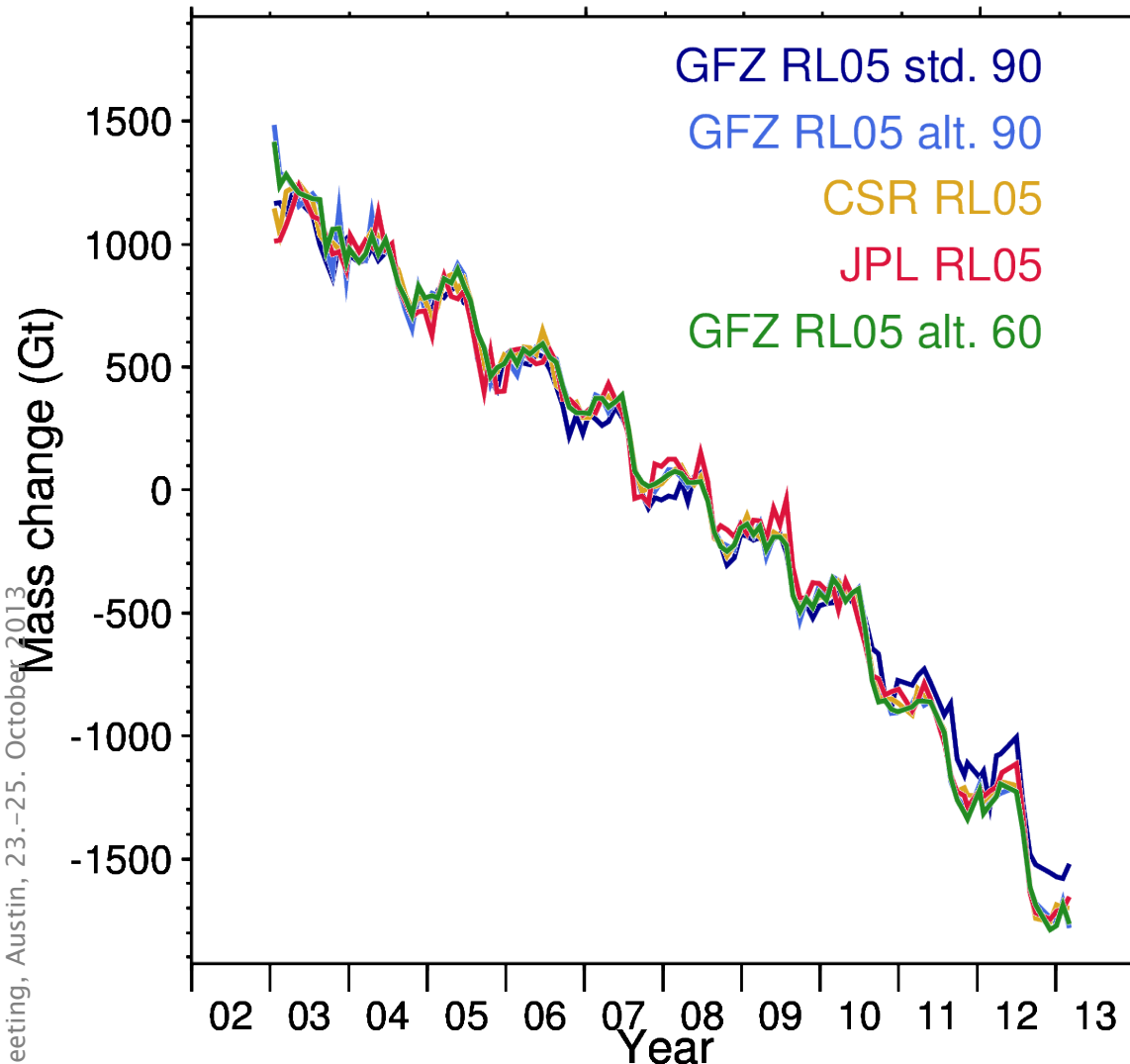
GRGS:  $-36 \pm 0.4$  mm/y

DMT:  $-34 \pm 1.3$  mm/y

ITG:  $-28 \pm 1.6$  mm/y



# Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?



Trend changes after 2010  
Higher noise (peaks)

RL05a close to CSR (n=60)  
(except 2003)

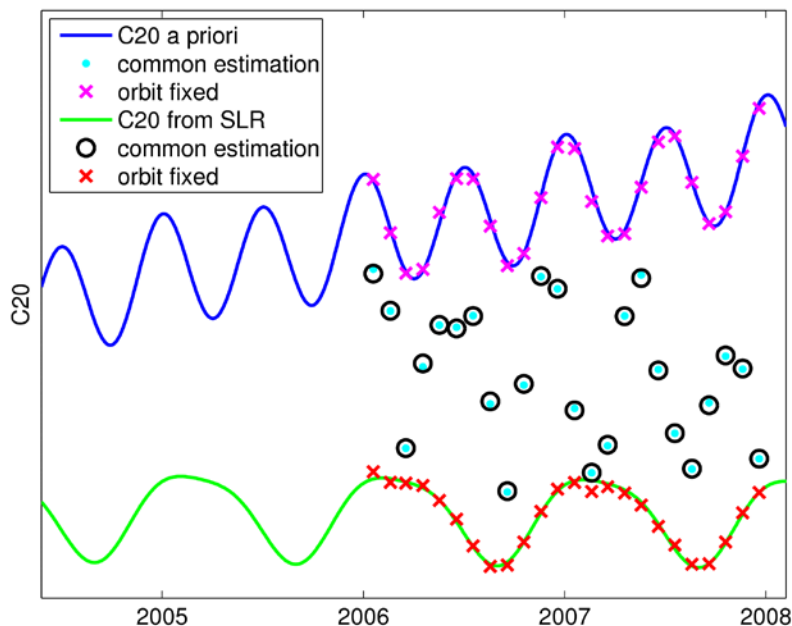
JPL also close to CSR and  
GFZ. Higher noise (peaks)

GFZa(n=60 solved) very  
close to CSR (except  
Jan/Feb 2003)

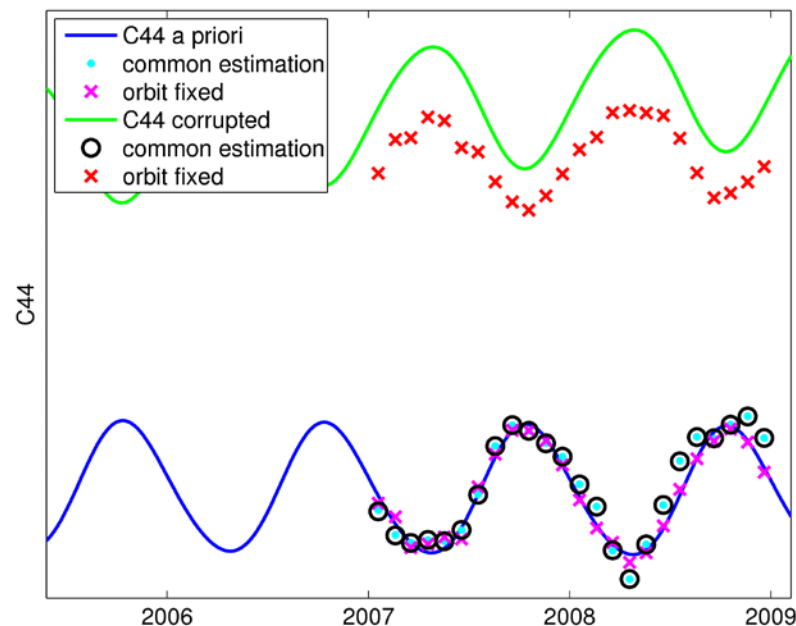
# Gravitationsfeld und Bahnen – separierbar ?

Adrian Jäggi et al. (2013): Towards combined monthly gravity field solutions, GRACE Science Team Meeting, Austin, 23.-25. October 2013

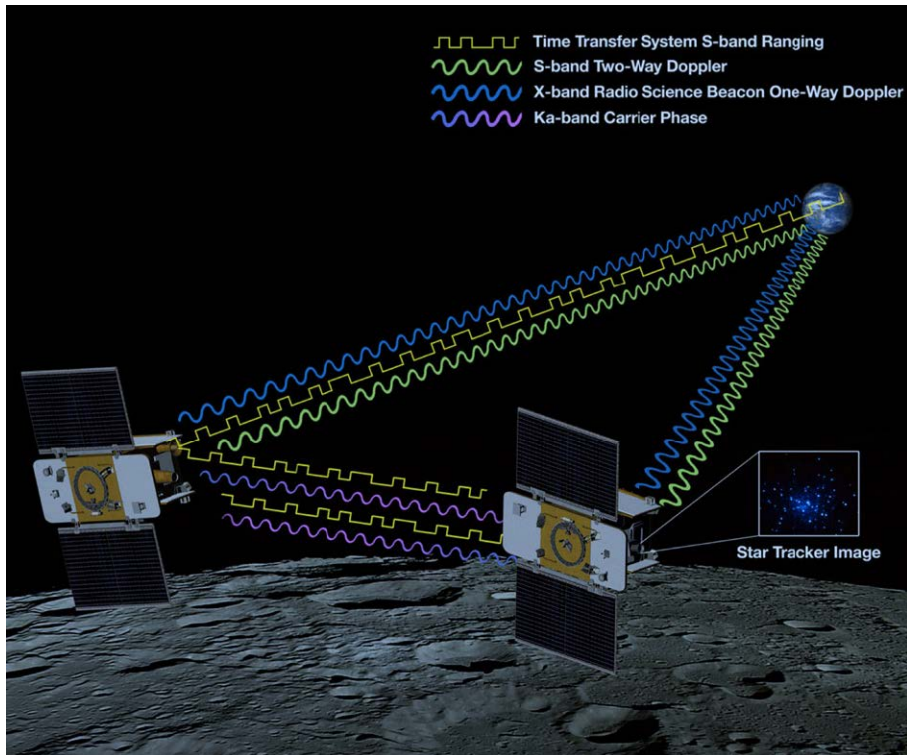
## C20



## C44



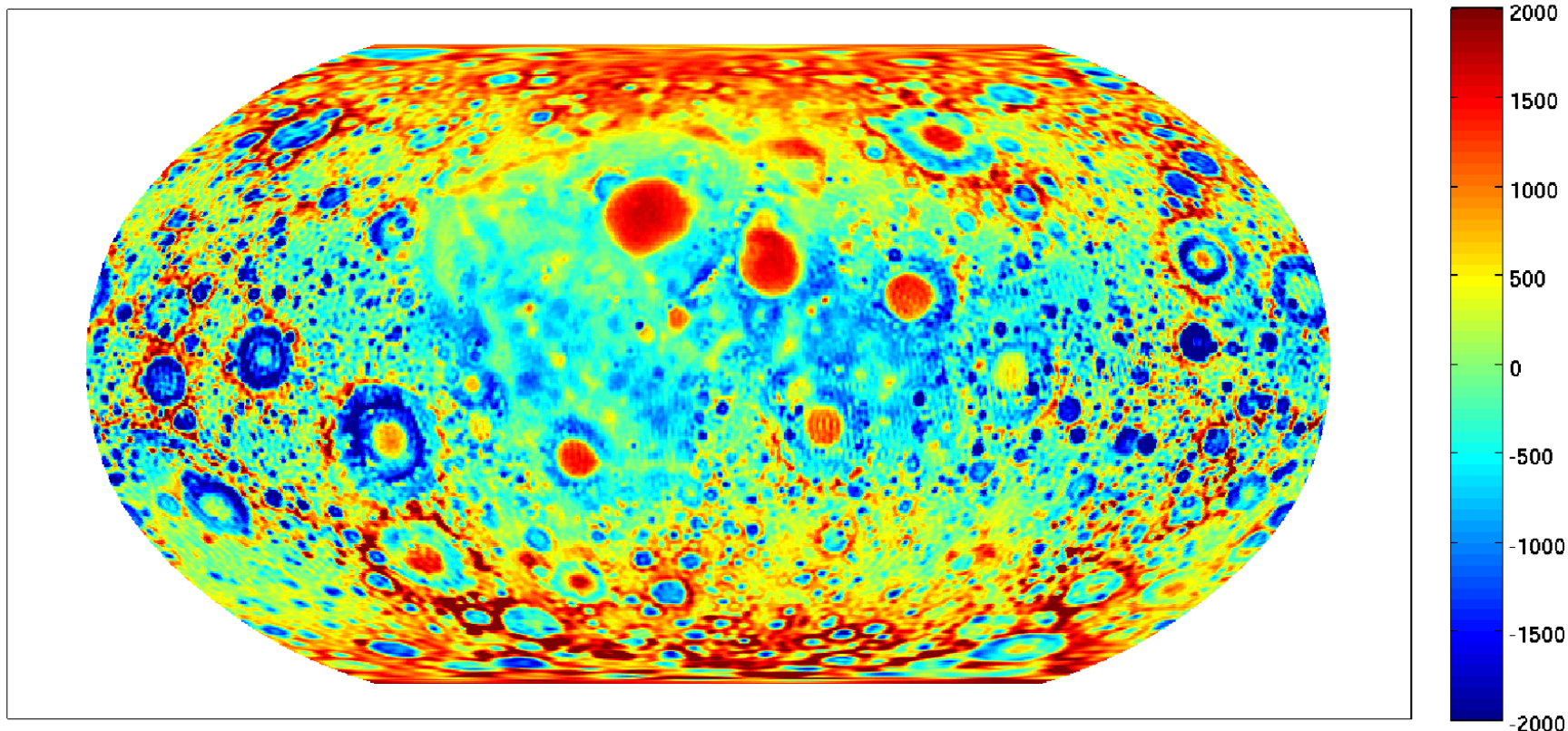
# GRAIL – Von der Erde zum Mond



- S-Band Zwischen-Satelliten-Link ( $\approx 2.3$  GHz) für Zeitübertragung
- S-Band Two-Way Doppler für Telemetrieübertragung
- X-Band One-Way Doppler (8.4 GHz) für Bahnbestimmung
- Ka-Band Zwischen-Satelliten-Link für die Bestimmung des Gravitationsfeldes

- Lunar Gravity Ranging System (LGRS) clock:
  - Stabile Uhr für Ka-Band Ranging (KBR), X-Band (RSB) und S-Band (TTS) Instrumente. Wird durch einen USO (Ultra Stable Oscillator) getrieben, erzeugt PPS (pulse per second) Signal.
- Base Time Clock (BTC):
  - On-Board Satellitenuhr mit geringer Stabilität.

# GRAIL – Von der Erde zum Mond



**Aufgrund der geringen Bahnhöhe über dem Mond von nur 55 km liefern bereits die Daten der 3-monatigen nominellen Missionsphase ein sehr detailliertes Bild des Mondschwerefeldes (offizielle Lösungen bieten eine Auflösung von 13 km).**

# Zusammenfassung

---

- Bahnbestimmung ist auch im Zeitalter der Space Geodesy eine **unverzichtbare** Technik. Ohne Bahnbestimmung könnten zusätzliche Messungen oft gar nicht ausgewertet werden.
- In vielen Fällen kann (darf) die Bahnbestimmung **nicht** von der Bestimmung der geophysikalisch relevanten Parameter entkoppelt werden. Ganzheitliche Ansätze sollten wenn immer möglich zum Einsatz kommen.
- **Systematische Fehler** in der Bahnbestimmung wirken sich oft störend auf die geophysikalisch relevanten Parameter aus und müssen minimiert werden.
- Sämtliche Satellitenbahnen (**GNSS, SLR, LEO**) haben das Potential zu einer Vielzahl geophysikalisch relevanter Parametern beizutragen, z.B. zu den tiefen Termen des Erdschwerefelds.



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

